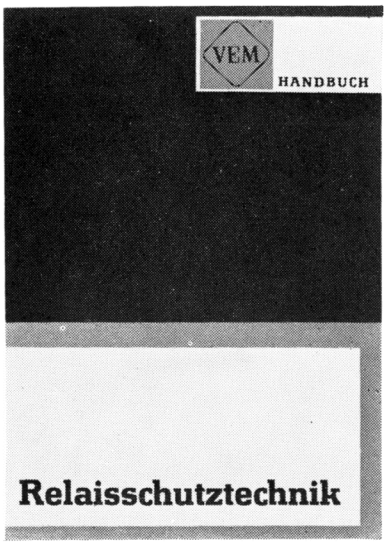
ELEKTRIE 6|89

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN · Postverlagsort für DDR Leipzig · EVP 2,50 Mark · ISSN 0013—5399

0120226

Auslieferung in diesen Tagen in vierter, bearbeiteter Auflage:



VEM-Handbuch Relaisschutztechnik

Von Obering. Wolfgang Doemeland. Herausgeber: Zentrum für Forschung und Technologie des VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin. 368 Seiten, 284 Bilder, 78 Tafeln, Kunstleder, DDR 27,50 M, Ausland 37,— DM. Bestellangaben: 5538939/Doemeland, Relaisschutz

Die vierte Auflage wird wiederum als bearbeitete Fassung vorgelegt. Dabei sind vor allem Aktualisierungen aufgrund neuer Festlegungen in Vorschriften sowie des Einsatzes neu- bzw. weiterentwickelter Schutzrelais erfolgt. Besonders zu erwähnen sind die Erläuterungen zu veränderten Bewertungskriterien beim Einsatz von Stromwandlern; Aspekte, die beim Betrieb von Schutzrelais mit elektronischer Schaltungstechnik zu beachten sind sowie die Erweiterung des Schutzes von Netzen mit niederohmiger und kurzzeitig niederohmiger Sternpunkterdung.
Der Autor vermittelt seine in langjähriger praktischer Arbeit speziell bei der Inbetriebsetzung von Relaisschutzeinrichtungen gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse. Ausgehend von der Meßgrößenerfassung und den verwendeten Schutzrelais wird der derzeitige Stand der Relaisschutztechnik in der DDR aus der Sicht des praktisch tätigen Ingenieurs dargelegt, und es werden Probleme der Projektierung, Prüfung, Inbetriebsetzung und Wartung von Relaisschutzeinrichtungen in anwendungsbereiter Form behandelt. Dazu gehören auch Fragen des Arbeits- und Brandschutzes, des organisatorischen Ablaufs beim Prüfen und Messen und der Qualifikation des Inbetriebsetzungs- und Wartungspersonals. Ein Ausblick auf Entwicklungstendenzen (rechnergestützter Schutz) wird gegeben.
Für den Praktiker werden vor allem die zahlreichen aufgezeigten Möglichkeiten zur Verbesserung der Qualität der Arbeit und zur Steigerung der Arbeitsproduktivität bei der Inbetriebsetzung und Wartung von Interesse sein. Bei der Abfassung des Buches hat der Autor auch viele Erfahrungen und Anregungen verarbeitet, die er bei den von ihm geleiteten Schulungen für Inbetriebsetzungsingenieure und Wartungspersonal gesammelt hat.

Bereits lieferbar in zweiter, stark bearbeiteter Auflage:

VEM-Handbuch Hochstromtechnik

Grundlagen, Dimensionierung und Ausführung von Hochstromanlagen

Von einem Autorenkollektiv unter Leitung von Doz. Dr. sc. techn. Gert Winkler. Herausgeber: Zentrum für Forschung und Technologie des VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin. 516 Seiten, 335 Bilder, 144 Tafeln, Kunstleder, DDR 43,— M, Ausland 60,— DM. Bestellangaben: 5537207/VEM-Hochstromtechnik

In der vorliegenden Auflage sind die in den letzten 10 Jahren auf dem Gebiet der Hochstromtechnik gewonnenen neuen wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse berücksichtigt: Probleme, die aus der Anwendung der Leistungselektronik und der Automatisierung der Produktionsprozesse auf mikroelektronischer Grundlagen resultieren, und solche aus der Einführung neuer Verfahren.
Hauptabschnitte des Buches: Allgemeine Gesichtspunkte für die Berechnung und Auswahl von Hochstromleitungen · Technische Kenndaten elektrotechnischer Betriebsmittel für Hochstromanlagen · Wechselstrom-Hochstromanlagen · Gleichstrom-Hochstromanlagen · Schutzmaßnahmen gegen gefährliche Durchströmungen · Prüfung und Inbetriebsetzung von Hochstromanlagen · Instandhaltung von Hochstromanlagen · Netzrückwirkungen durch Hochstromanlagen · Vorschriftenverzeichnis.

Im Fachbuchhandel erhältlich

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

6|89 ELEKTRIE

43. Jahrgang

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik

ISSN 0013-5399

Organ des Fachverbands Elektrotechnik der Kammer der Technik

Die Zeitschrift erhielt die Goldene Ehrenplakette der KDT

Redaktionsbeirat

Vorsitzender:

Prof. Dr. sc. techn. J. Vogel

Mitglieder:

Prof. Dr. sc. techn. S. Altmann · Prof. Dr. sc. techn. H. Böhme · Prof. Dr. sc. techn. Dr. h. c. P.-K. Budig · Dr. sc. techn. G. Burkhard · Dr.-Ing. D. Flügge · Obering. K. Friedel · Prof. Dr. sc. techn. J. Hoffmann · Dipl.-Ing. H. Kabisch · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Lappe · Dr. rer. nat. K. Möbius · Prof. Dr. sc. techn. E. Muschick · Prof. Dr. sc. techn. V. Pfeiler · Prof. Dr.-Ing. e.h. K. Pommer · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schönfeld · Obering. Dipl.-Ing. N. Wass · Prof. Dr.-Ing. habil. G.Wunsch

Korrespondenten:

Dr.-Ing. K. Hannella, Ilmenau · Dr.-Ing. W. Jordan, Dresden

Titelbild

Seit vielen Jahren arbeiten der VEB Transformatorenwerk „Karl Liebknecht" und die Technische Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik, auf dem Gebiet der konventionellen und nichtkonventionellen Wandler im Rahmen fester Forschungsbeziehungen zusammen.
Unser Bild zeigt ein Schaltfeld, ausgerüstet mit Hochspannungsgeräten aus dem VEB Transformatorenwerk „Karl Liebknecht".

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Träger des Ordens Banner der Arbeit

Inhalt

Seite

Aktuelle Information 202

Schmidt, J.
Der Transformatorenbau vor neuen Aufgaben 203

Paulig, E.
Transformatoren und Meßwandler — ein konventionelles Arbeitsgebiet 204

Fachaufsätze

Ermisch, J.
20 Jahre Forschung auf dem Gebiet nichtkonventioneller Wandler 205

Kunckel, K.-H.
Stromwandler — Stand der Entwicklung 208

Winkler, W.
Korrekte Funktionsweise von Schutzeinrichtungen trotz temporärer Stromwandlersättigung 211

Jalmuzny, W.
Bestimmung des Gesamtfehlers von Stromwandlern im Überstromgebiet mittels Spannungsabbildungsmethode 213

Roseburg, R.
Verlustberechnung in ferromagnetischen Kesselabschirmungen und in den damit geschirmten Kesselteilen von Transformatoren 216

Buchholz, D.; u.a.
Überspannungsmeßgerät 219

Gruhn, G.
Prüfung und Anwendung von Schutzstromwandlern mit Schichtkernen 222

Kubusch, M.
Berechnung der Verluste in elektromagnetisch abgeschirmten Preßstangen von Transformatoren 225

Bunzel, E.; Oswald, B.
Tendenzen in der mathematischen Darstellung nichtstationärer Betriebszustände von Synchronmaschinen 228

Umschau

Persönliches 233

Fachtagungen 236

Bücher 236

AKTUELLE INFORMATION

Anwendung von Verfahren der Technischen Diagnostik an elektrotechnischen Betriebsmitteln

4. Tagung

Zeit: 17. Oktober 1989
Ort: Schkopau
Veranstalter: Fachsektion Elektrotechnik in der KDT-Betriebssektion Kombinat VEB CHEMISCHE WERKE BUNA Schkopau gemeinsam mit dem Wissenschaftsbereich Hochspannungstechnik der Sektion Elektrotechnik an der TU Dresden

Inhaltliche Schwerpunkte
— Die zustandsabhängige Instandhaltung an elektrotechnischen Betriebsmitteln auf der Basis einer rechnergestützten Technischen Diagnostik
— Möglichkeiten der Einbeziehung der Diagnosetechnik in die Konstruktion elektrotechnischer Betriebsmittel an Beispielen

Anfragen
Anmeldungen und Vortragsmeldungen sind zu richten an:
Kombinat VEB CHEMISCHE WERKE BUNA, KDT-Fachsektion Elektrotechnik
z. Hd. *O. Maus*, C 952
Tel. 492780
Schkopau, 4212
O. Maus, Schkopau EA 3074

Technische Gase

6. Fachtagung mit Beteiligung der RGW-Staaten

Zeit: 16. und 17. November 1989
Ort: Leipzig
Veranstalter: Fachausschuß Technische Gase im Fachverband Chemische Technik der Kammer der Technik

Inhaltliche Schwerpunkte
— Entwicklung, Bau und Betrieb von Anlagen für die Produktion, Lagerung und den Transport von technischen Gasen
— Energetische und ökonomische Betrachtungen beim Betrieb von Luftzerlegungsanlagen
— Automatisierung von Luftzerlegungsanlagen
— Meß- und Regeltechnik im Betrieb für technische Gase
— Analytik von technischen Gasen sowie von speziellen Gasen für Hoch- und Schlüsseltechnologien
— Probleme der Versorgung mit technischen Gasen sowie der Anwendung
— Probleme der Sicherheitstechnik

Anfragen
sind zu richten an:
Kammer der Technik
Fachverband Chemische Technik
Postfach 1315 Berlin, 1086
Telefon: 2265224, Telex 0114841
D. Queck, Berlin EA 2887

Elektronische Stromversorgungstechnik — eine Voraussetzung für Schlüsseltechnologien

XVI. Fachtagung des Fachausschusses 14

Zeit: 28. November 1989
Ort: Berlin
Veranstalter: Fachverband Elektrotechnik in der Kammer der Technik; Fachausschuß 14" Steuerungs- und Regelungstechnik

Inhaltliche Schwerpunkte
— Schaltnetzteile — neue Bauelemente — neue Werkstoffe
— Praktische Schaltungstechnik
— Schutzgüte und neue Standards

Anfragen
und Teilnahmemeldungen sind schriftlich zu richten an:
Kammer der Technik
Präsidium
Fachverband Elektrotechnik
Clara-Zetkin-Str. 115/117
Berlin, 1086
H. Hoppe, Berlin EA 4000

Elektroantriebstechnik und Elektroautomatisierungstechnik

7. Fachtagung mit internationaler Beteiligung

Zeit: 26. und 27. April 1990
Ort: TU „Otto von Guericke" Magdeburg
Veranstalter: Sektion Automatisierungstechnik und Elektronik

Thematische Schwerpunkte
— Entwicklung der elektrischen Antriebstechnik im Zeichen der Schlüsseltechnologien
— Einsatz elektrischer Antriebssysteme und Elektroautomatisierungslösungen im Schwermaschinen- und Anlagenbau
— Rechnergestützter Entwurf von Baugliedern für Elektroantriebssysteme
— Einsatz der Drehstromantriebstechnik

Anfragen
Technische Universität „Otto von Guericke" Magdeburg
Tagungsbüro: Tel. 592209, Telex 018214
Postschließfach 124, Magdeburg, 3010
Lehnert, Magdeburg EA 3097

Qualifizierung von Fachkräften zu Schmierungsfachkräften

Internatslehrgänge

Ziel: Befähigung zur selbständigen Ausführung aller schmierungstechnischen Arbeiten in Produktions- und Instandhaltungsbereichen

Grundlehrgang
vom 13. bis 24. November 1989
— Reibung und Verschleiß
— Schmierstoffe
— Organisation der Schmierungstechnik
— Schmierverfahren
— Schmierungseinrichtungen

Aufbaulehrgang
(2 Wochen) im 1. Halbjahr 1990
— Schmierstoffe
— Schmiersysteme
— Altölwirtschaft
— Fertigungshilfsstoffe, Additive, Wälzlager
— Arbeitsschutz

Abschlußlehrgang
(2 Wochen) im 2. Halbjahr 1990
— Schmierungstechnisches Labor
— Gleitlager, Dichtungen, Pflege von Hydraulikanlagen, Schmierung ausgewählter Baugruppen

Anfragen
Bezirksvorstand Halle der KDT
Koll. *Wolf*, Tel. 37136
Geschwister-Scholl-Str. 39
Postschließfach 24, Halle, 4030
S. Krausche, Berlin EK 4006

Beleuchtungstechnik

Internatslehrgang (2 Wochen)

Zeit: 2. Halbjahr 1989
Veranstalter: Bezirksvorstand Halle der KDT, Bereich Weiterbildung

Inhaltliche Schwerpunkte
— Physiologische Grundlagen der Beleuchtungstechnik
— Photometrische und lichttechnische Grundgrößen
— Photometrische und lichttechnische Einheiten
— Lichtmeßtechnik
— Tageslichtbeleuchtung
— Rationelle Energieanwendung in der Beleuchtungstechnik
— Farbwahrnehmung und Wirkung der Farben auf den Menschen
— Güte der Beleuchtung im Innenraum, Betreiben, Wartung und Instandhaltung von Beleuchtungsanlagen, Berechnungsverfahren in der Beleuchtungstechnik; Planung und Gestaltung von Innenbeleuchtung unter Einbeziehung der Rechentechnik
— Leuchten und ihre Anwendung
— Lichterzeugung und elektrische Lampen
— Berechnung von Leuchtdichten in der Straßenbeleuchtung
— spezielle Probleme zur Lichtanwendung in diversen Situationen
— Übung zur Planung einer Beleuchtung
— Anfertigung einer Belegarbeit bzw. mündliche Prüfung

Auskünfte
Bezirksvorstand Halle der KDT
Koll. *Wolf*, Tel. 37136
Geschwister-Scholl-Str. 39
Postschließfach 24, Halle, 4030
S. Krausche, Berlin EK 4005

Elektromagnetische Verträglichkeit in der Rundfunk- und Fernsehempfangstechnik

Internatslehrgang (1 Woche)

Zeit: IV. Quartal 1989
Veranstalter: Bezirksvorstand Halle der KDT, Bereich Weiterbildung

Inhaltliche Schwerpunkte
— EMC-Grundlagen
— Störfestigkeitsforderungen an Hör- und Fernseh-Rundfunkgeräten und Empfangsantennenanlagen
— Erfahrungen bei der Erhöhung der Störfestigkeit
— HF-Störbeeinflussung in der Digitaltechnik
— EMC-Normung und Standardisierung
— nationale Bestimmungen zum „elektrischen Umweltschutz"

Auskünfte
Bezirksvorstand Halle der KDT
Koll. *Wolf*, Tel. 37136
Geschwister-Scholl-Str. 39
Postschließfach 24, Halle, 4030
S. Krausche, Berlin EK 4004

Der Transformatorenbau vor neuen Aufgaben

Von

Dr.-Ing. J. Schmidt

Leiter des
Hochspannungslabors
des VEB Transformatorenwerk
„Karl Liebknecht"

Der Transformator, ein in seinen Prinzipien über 100 Jahre altes und millionenfach bewährtes Betriebsmittel, hat seine Bedeutung für eine rationelle Energieübertragung auch im Zeitalter der Mikroelektronik nicht verloren. Im Gegenteil, die zukünftige, vollautomatische Netzführung, der weiter steigende Elektroenergiebedarf, die Minimierung der Umweltbeeinflussung und die volkswirtschaftlich notwendige höhere Materialausnutzung stellen den Transformatorenbau der DDR vor qualitativ neue Aufgaben. Der Großtransformator bleibt auch im automatisch geführten Netzverband wichtiges Anpaß- und Stellglied für eine ökonomische und verlustarme Energieübertragung, jedoch erhöhen sich dabei die Betriebsbeanspruchungen und die Anforderungen an die Zuverlässigkeit verschiedener Bauelemente des Transformators um nahezu eine Größenordnung.

So werden sich beispielsweise die mittleren Schaltzahlen für die in den Transformatoren eingebauten Stufenschalter beim Übergang von der handgeführten zur automatischen Netzführung von etwa 4000 auf 40000 Schaltungen im Jahr erhöhen und möglicherweise neue Schaltprinzipien, in jedem Fall aber wesentlich höhere Zuverlässigkeiten der Stufenschalter erzwingen. Andererseits erfordern solche Schaltzahlen aber auch neue Diagnosemethoden zur Betriebsüberwachung des Stufenschalters und seiner Verschleißteile.

Durch die automatische Netzführung werden auch an andere Transformatorenbaugruppen höhere Anforderungen an Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit gestellt, für große Transformatoreneinheiten wird die kontinuierliche Betriebsüberwachung notwendige Voraussetzung. Der Transformatorenbauer steht damit vor der Aufgabe, Sensoren und Übertragungstechniken zu entwickeln, deren MTBF-Intervalle im Bereich derjenigen des zu überwachenden Transformators, nämlich bei 30 bis 50 Jahren liegt, wenn übermäßige Redundanz und aufwendige Wartungsarbeiten vermieden werden sollen.

Neue Anforderungen werden neuerdings auch an das Isolationssystem solcher Transformatoren gestellt, die direkt mit gasisolierten Schaltanlagen (GIS) verbunden sind. Beim Schalten der Trennschalter in GIS werden durch multiple Vor- und Rückzündungen zwischen den Kontakten sehr steile (ns-Bereich), oszillierende transiente Überspannungen (VFTO) ausgelöst, die durch die GIS praktisch ungedämpft fortgeleitet, im Transformator Überspannungen anregen können, deren Beanspruchungen bisher von keiner Transformatorenprüfung erfaßt werden. Gleiches gilt für die entstehende Überspannungsbeanspruchung am Transformator, wenn in GIS Durchschläge bei Blitzspannung mit Amplituden des Isolationspegels auftreten. Arbeitsgruppen der Cigre als auch die Transformatorenindustrie der DDR erforschen in Verbindung mit Hochschulen und Universitäten diese Phänomene und deren Beherrschung.

Neue Anforderungen zur Minimierung der Umweltbeeinflussung durch Transformatorengeräusche sowie die Anstrengungen zur Einsparung von Übertragungsverlusten führen zu einer neuen Auslegungsphilosophie auch für Großtransformatoren.

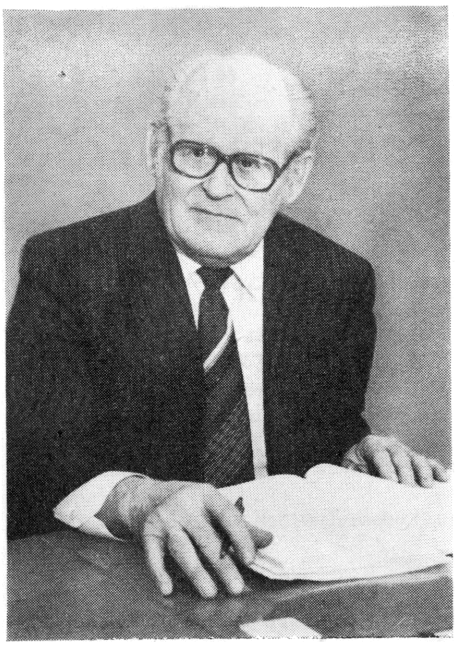
Gefragt ist nicht länger der massearme Transformator mit geringsten Gestehungskosten, sondern der verlust- und geräuscharme Transformator, der näher an oder in Wohngebieten installiert werden kann. Da der Weg einer einseitigen Erhöhung der spezifischen Einsatzmassen zur Erreichung dieser Zielstellung volkswirtschaftlich in der DDR nicht gangbar ist, müssen neue Lösungen für Kernbauformen, Preßelemente und Zubehör entwickelt werden, die Geräuschminderungen bringen und eine Optimierung des Materialeinsatzes ermöglichen. Für den Großtransformatorenbau der DDR besteht weiterhin die Aufgabe für die Leistungsabführung aus den Kernkraftwerken neue Transformatoren mit 1050 MVA Übertragungsleistung zu entwickeln und zu fertigen, wobei Zuverlässigkeiten zu projektieren und zu realisieren sind, die eine störungsfreie Betriebszeit von 30 Jahren garantieren. Die Grundlagenuntersuchungen zur Beherrschung der thermischen Probleme großer Transformatoren sind weiter zu intensivieren. Stand bisher die Vermeidung von lokalen, betriebsgefährdenden Heißstellen im Vordergrund der Untersuchungen, so ist es jetzt die weitgehende Ausschaltung von Zusatzverlusten als Beitrag zur Senkung der Gesamtverluste.

Zum technischen Fortschritt im Transformatorenbau wird auch zukünftig der Werkstoffeinsatz nur durch die weitere Verbesserung des Kernmaterials, z.B. durch Bereitstellung von lasergeritzten Hi-Bi-Blechen, beitragen, während alternative oder bessere Isolierstoffe zum klassischen Öl/Papier/Preßspan-System für Großtransformatoren nicht in Sicht sind. Um so mehr kommt es darauf an, den technischen Fortschritt durch fundierte wissenschaftlich-technische Durchdringung der Entwicklung, Herstellung und Prüfung von Transformatoren zu erzielen, wobei die bewährte Zusammenarbeit zwischen den Transformatorenbetrieben und den Hochschulen und Universitäten der DDR gute Voraussetzungen für diese Aufgaben bieten.

In diesem Heft werden einige Beiträge veröffentlicht, die in Zusammenarbeit zwischen dem VEB Transformatorenwerk „Karl-Liebknecht" und dem Bereich Transformatoren und Meßwandler der Technischen Universität Dresden unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. W. Brendler entstanden sind.

EA 3060

Transformatoren und Meßwandler – ein konventionelles Arbeitsgebiet?



Zum 65. Geburtstag von NPT Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Brendler, ordentlicher Professor für Transformatoren und Meßwandler an der Technischen Universität Dresden

Unbestritten sind Transformatoren und Meßwandler wesentliche Elemente der Elektroenergieübertragung. Gleichermaßen ist das physikalische Wirkprinzip des Transformators als Leistungs- oder Meßwertübertrager seit über 100 Jahren bekannt und sind die darauf beruhenden konstruktiven und technologischen Lösungen in dieser Zeit ausgereift.

Die in der Überschrift formulierte Frage kennzeichnet deshalb den Widerspruch, dem sich der Jubilar in seinem 35jährigen Berufsleben und den 26 Jahren seines Wirkens als Hochschullehrer gestellt hat und den er gemeinsam mit seinem Arbeitskollektiv bewältigte.

Auf dem Gebiet des Transformatorenbaus widmete er sich insbesondere der Bestimmung der Zusatzverluste in aktiven und inaktiven Konstruktionsteilen und deren Verringerung durch konstruktive und technologische Maßnahmen.

Für dieses Arbeitsgebiet bestimmende Entwicklungsforderungen waren

- der Übergang zu größeren Einheitsleistungen der Transformatoren im Zusammenhang mit der Erhöhung der Kraftwerksblockleistung und dem Ausbau der Kopplung leistungsstarker Energieversorgungsnetze
- die Erhöhung der Zuverlässigkeit der Transformatoren durch Vergleichmäßigung der thermischen Beanspruchung, insbesondere durch Vermeidung von Heißpunkten
- der energieökonomische Betrieb von Transformatoren im Elektroenergieversorgungssystem unter besonderer Berücksichtigung der thermischen Auslastung.

Das für die Grundlagenforschung bestimmende Motiv ergab sich damit aus der Erkenntnis, daß einerseits in den vergangenen 3 Jahrzehnten mit dem Einsatz hochwertiger Transformatorenbleche und Isoliermaterialien, durch Optimierung der Auslegung und Konstruktion sowie die Entwicklung der Technologie wesentliche Reserven zur Erzeugnisentwicklung erschlossen werden konnten, andererseits aber der Anteil der Zusatzverluste an den Gesamtverlusten, hervorgerufen durch das magnetische Streufeld und dessen Wirkung auf Wicklung, Kern und inaktive Konstruktionsteile wächst und insbesondere auftretende Flußkonzentrationen im Streufeldbereich über die Ausbildung von Hot spots die Lebensdauer der Wicklung erheblich beeinträchtigen. Über die experimentelle Modellierung von Großtransformatoren, die analytische und dreidimensionale numerische Berechnung der Felder und deren Wirkungen innerhalb und außerhalb des Transformatorenkernes wurden entscheidende Voraussetzungen für konstruktiv technologische Lösungen zur Vermeidung örtlicher Überhitzungen und zur drastischen Senkung der Verluste geschaffen. Die Forschungsergebnisse haben u.a. maßgeblich dazu beigetragen, daß im VEB Transformatorenwerk „Karl Liebknecht" Berlin die Entwicklung und Fertigung von Großtransformatoren aufgenommen und der Leistungsbereich des Typensortiments wesentlich erhöht werden konnte.

Das Gebiet der Meßwandler hat im Vergleich zum Transformatorenbau in den letzten 3 Jahrzehnten eine beachtenswerte Innovationsrate. Als Hauptkonstrukteur für den Bereich Wandler hat der Jubilar einen hohen Anteil an der Entwicklung der zum damaligen Zeitpunkt neuartigen Generation von Mittelspannungswandlern mit Epoxidharzisolation und deren Überführung in die Produktion. Mit wissenschaftlichen Arbeiten zur Theorie und Berechnung sowie zum stationären Überstrom- und transienten Verhalten von Stromwandlern konventioneller Bauart wurden wesentliche Beiträge zur Entwicklung dieses Erzeugnissortiments unter seiner Leitung weitergeführt.

Der von der Mikroelektronik geprägten Entwicklung des Fachgebietes folgend, engagierte sich der Jubilar mit seinem Forschungskollektiv besonders für die Entwicklung nichtkonventioneller Stromwandler und erreichte auf diesem neuen Forschungsgebiet bedeutsame und interenational anerkannte Ergebnisse.

Mit der Untersuchung neuer Wirkprinzipien passiver und aktiver nichtkonventioneller Wandler auf der Grundlage des Faraday-Pockels- und Mikrowellenwandlers sowie der Modifikation des Traser-Wandlers wurden physikalische Sensorprinzipien technikrelevant aufbereitet und der Theoriebestand erweitert, wurden die beim Einsatz nichtkonventioneller Wandler auftretenden Probleme der Signalverarbeitung für Meß- und Schutzzwecke untersucht und neuartige Lösungen zur Hilfsenergiebereitstellung auf Hochspannungspotential erarbeitet.

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten zur Theorie und Technik fehlerkompensierter Stromwandler auf der Grundlage des Nullfluß- und Brückenstromwandlers konnten erfolgreich in die Praxis überführt werden und sind die Grundlage der heute im VEB Transformatoren- und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden für die Automatisierungstechnik hergestellten Allstromwandler.

Der Jubilar hat mit seinen wissenschaftlichen Arbeiten auf die in der Überschrift formulierte Fragestellung eine eindeutig positive Antwort gegeben. Das Entwicklungstempo und die Innovation in den Disziplinen der Ingenieurwissenschaften ist, von vielen Faktoren abhängig, sehr differenziert. Die gesellschaftlichen Erfordernisse und Möglichkeiten bestimmen den Potentialeinsatz für die Grundlagenforschung und zwingen zur Konzentration auf jene die Entwicklung bestimmenden Disziplinen. Damit wächst aber gleichermaßen die Verantwortung der Ingenieure und Wissenschaftler in den anderen Gebieten. Aufgeschlossenheit gegenüber allem Neuen, die Fähigkeit Neues für ein scheinbar konventionelles Arbeitsgebiet zu erschließen und die Beharrlichkeit, diese Erkenntnisse bis zur praktischen Anwendung zu führen, sind Eigenschaften, die der Jubilar auf seine Mitarbeiter und Schüler zu übertragen bemüht war.

Dafür gelten ihm Dank und Anerkennung und begleiten ihn unsere besten Wünsche auf seinem weiteren Lebensweg.

E. Paulig, Dresden EA 3014

20 Jahre Forschung auf dem Gebiet nichtkonventioneller Wandler

J. Ermisch, KDT, Dresden

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* zum 65. Geburtstag

Seit etwa 20 Jahren werden am Lehrstuhl für Transformatoren und Meßwandler im Wissenschaftsbereich Elektrische Maschinen der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* Arbeiten zur Vorlaufforschung zu neuen Meßprinzipien in der energetischen Elektrotechnik durchgeführt. Angeregt durch entsprechende Arbeiten führender Hersteller von Meßwandlern, nach neuen Wegen zur Erfassung des Meßwertes Strom zu suchen, begann auch an der TU Dresden im Auftrag des Industriepartners die Forschung zum Thema „nichtkonventionelle Meßwandler".
Im Beitrag werden einige Aspekte zur Charakteristik derartiger Wandler aufgezeigt und bereits realisierte beschrieben.

1. Nichtkonventionelle Wandler

Nichtkonventionelle Meßwandler sind Meßeinrichtungen, die den Meßwert auf einem Potentialniveau erfassen und in geeigneter Form auf ein anderes leistungslos oder leistungsarm übertragen und dabei eine Hilfsenergiequelle, die auch den Leistungsbedarf für die angeschlossene(n) Bürde(n) deckt, benötigen. Durch diese Definition [1] ist bereits schon der grundlegende Unterschied zwischen dem konventionellen Meßtransformator, der die im Sekundärkreis umgesetzte Leistung mit überträgt, und den neuen Methoden dargelegt (Bild 1).
Allein die Analyse der beiden Blockschaltbilder läßt bereits zwei Aussagen zu:

1. Ein nichtkonventioneller Meßwandler kann auf Grund des stets erforderlichen Einsatzes elektronischer Baugruppen nicht so zuverlässig sein, wie eine einfache Zweiwicklungsanordnung.
2. Es ist eine Hilfsenergiequelle erforderlich. Bei Beibehaltung gleicher Daten des Sekundärkreises (d.h. Nennausgangsströme von 5 bzw. 1 A, Nennleistungen von einigen VA und Nenngenauigkeitsgrenzfaktoren im Bereich von 10 bis 100), muß die Hilfsenergiequelle in der Lage sein, kurzzeitig eine Leistung bis zu einigen kW beim Auftreten von Überströmen abgeben zu können, wobei der erforderliche Leistungsverstärker entsprechende Parameter haben muß.

Diese Gründe sind es auch, weswegen bis auf wenige noch zu nennende Sonderformen nichtkonventionelle Meßwandler nicht über das Laborstadium oder die Erprobung im Netz hinaus kommen und noch nirgends zu einer Serienreife gelangt sind. Dennoch erscheint es nach jetzigen Erkenntnissen doch Möglichkeiten zu geben, derartige Meßglieder zweckmäßig mit und nicht anstelle von herkömmlichen Wandlern einzusetzen.

2. Bisher untersuchte Wandler

Als ein mögliches Kriterium zur Systematisierung neuer Wandler eignet sich die Übertragungsfrequenz der Information „Meßgröße":

- magnetische Meßwertübertragung ohne Modulation (50 Hz)
- Übertragung mit Hilfsträger (10^5 bis 10^7 Hz) über vorzugsweise optische Kanäle (Lichtwellenleiter)
- Mikrowellenübertragung (etwa 10^{10} Hz)
- Übertragung durch direkte Modulation des Lichts (10^{12} bis 10^{15} Hz).

Im Bild 2 sind die wesentlichsten an der TU Dresden untersuchten Wandler mit Hinweisen auf andere äquivalente Arbeiten zusammengestellt.
Die Wichtung der Eigenschaften der dargestellten Typen erfordert noch die Betrachtung der Weiterentwicklung der Elektronik, verbunden mit einer Reduzierung des spezifischen Hilfsenergiebedarfes. So können zum derzeitigen Stand der Technik Konzepte wieder attraktiv werden, die zum Zeitpunkt der Untersuchungen aus Gründen der Verfügbarkeit hoch integrierter Bauelemente und/oder deren Hilfsenergiebedarf nicht relevant erschienen. Das trifft in jedem Fall auf das „Traser"-Konzept zu, das heute mit Mitteln der moderneren Elektronik gänzlich andere Realisierungschance hat. Ein Beispiel, wenn auch für einen anderen Einsatzfall ausgelegt, ist die durchaus in einem Traser-Wandler einsetzbare Baugruppe des mikrorechnergesteuerten Spannungsüberwachungssystems Hochspannung [15] mit einem Hilfsenergiebedarf von weniger als 3 W für den Meßwertumsetzer und den optischen Sender, wobei zu berücksichtigen ist, daß im Gegensatz zum Prototyp des optischen Wandlers mit PDM/PPM-Modulation ein serielles binär codiertes Ausgangssignal zur Weiterverarbeitung zur Verfügung steht.
Ein anderes Kriterium ist die Wartungsmöglichkeit und damit die Zugänglichkeit der elektronischen Baugruppen. Diesen Sachverhalt konsequent in Rechnung stellend, wird in den letzten Jahren an der TU Dresden vorzugsweise der passive nichtkonventionelle Wandler, der keine elektronischen Baugruppen auf Potential hat, verfolgt. Baugruppen auf Erdpotential lassen sich relativ leicht mit Hilfsenergie versorgen und sind gegebenenfalls im Betrieb austauschbar. Der Meßwertgeber ist hierbei nach wie vor ein konventioneller Wandler, allerdings mit erheblich geringerer Bürdenleistung, was in jedem Fall eine Dimensionierung als Einleiterstromwandler mit massearmen Kern ebenso zuläßt wie die Auslegung als Wandler mit hohem Dynamikbereich entsprechend der IEC-Klassifizierung (TRY und TPZ).
Eine Sonderform des nichtkonventionellen Wandlers, dessen erster Typ bereits in den zwanziger Jahren entwickelt wurde, ist der Gleichstromwandler. Speziell für die Forderungen der Umrichter für Drehstromantriebe wurde der „Allfrequenzstromwandler" entwickelt, der als AI-Reihe vom VEB Transformatoren und Röntgenwerk „Herrmann Matern" in Dresden gefertigt wird [19] [20]. Wandler für die Erfassung von Gleichströmen sind in jedem Fall nichtkonventionelle Wandler, deren Sekundärleistung von externen Quellen bereitgestellt werden muß. Unter Nutzung der Grundbaugruppen des Allfrequenzstromwandlers wurde ein Hochstromwandler für Elektrolyseanlagen [21] geschaffen, der sich in der Praxis bewährt hat und vor allem für kleinräumige Schaltanlagen geeignet ist. Auf Grund des leistungsarmen Ausgangssignals und der Notwendigkeit einer speziellen Meßtechnik zum Einmessen des Sensors ist eine Produktionsaufnahme bislang noch nicht erfolgt.
Auch im Sinne eines nichtkonventionellen Wandlers ist die Anordnung zur Erfassung von Strömen mit einer Rogowski-Spule zu werten. Diese Anordnungen werden in der technischen Diagnostik häufig benutzt; die Anwendung als Meßwandler scheitert zumeist an der Langzeitstabilität der analogen Integratoren, hingegen kann der Einsatz in Schutzwandlern durchaus bei einer entsprechenden Meßwertverarbeitung erfolgversprechend sein [5] [8].
Sogenannte Brückenwandler [10] bis [13] bedingen zwar einen Leistungsverstärker entsprechend hoher Ausgangsleistung, können aber vorteilhaft als Präzisionswandler, als Anpaßwandler in bestehenden Schaltanlagen (keine zusätzliche Bebürdung für den Meßkreis) oder als nachrüstbare Wandler hoher Genauigkeit, z.B. an Durchführungen, Verwendung finden. Muster dieser Wandler befinden sich seit längerer Zeit in Erprobung.

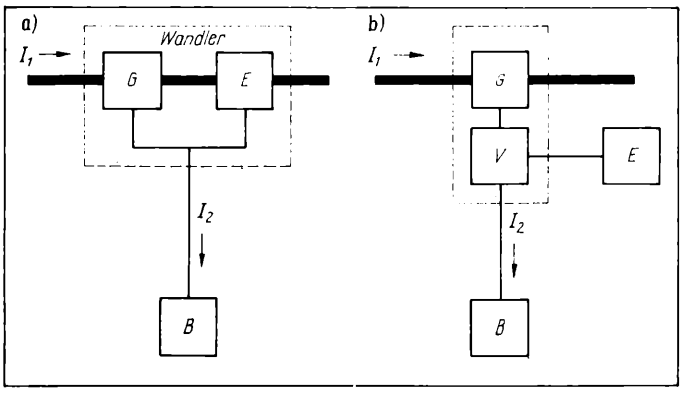
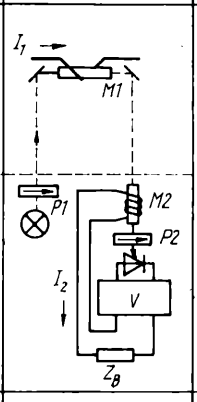
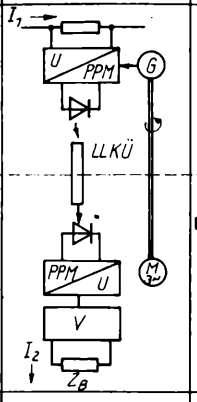
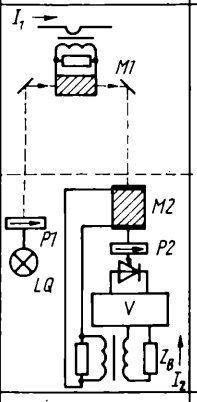
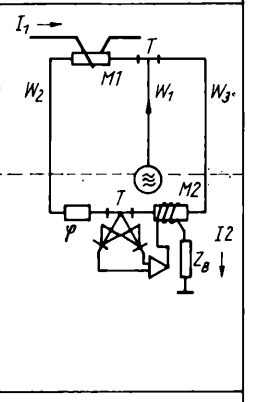


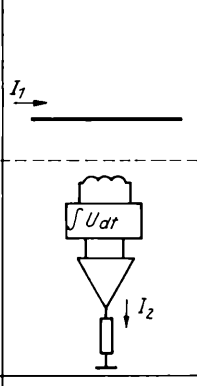
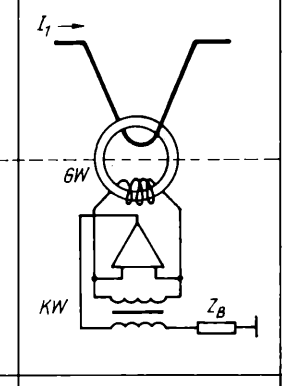
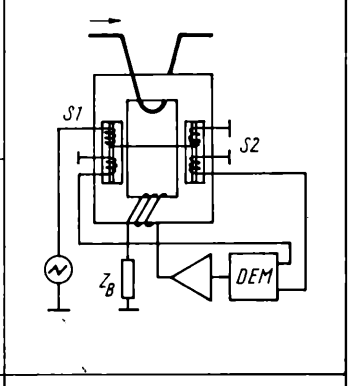
Bild 1. Konventioneller (a) und nichtkonventioneller (b) Wandler
G Informationsgeber; E Energiequelle; V Leistungsverstärker; B Bürde

Dr. sc. techn. *Jochen Ermisch* ist Bereichsoberassistent am Wissenschaftsbereich Elektrische Maschinen der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden.

Bild 2. Zusammenstellung der an der TU Dresden untersuchten nichtkonventionellen Wandler (Prinzipien stark vereinfacht)

LQ monochromatische Lichtquelle; P1, P2 Polarisator/Analysator; M1, M2 Modulator/Demodulator; W1, W2, W3 dielektrischer Mikrowellenleiter; T T-Glied; GW Geberwandler; KW Kompensationswandler; S1, S2 Sonden

	Faraday - Effekt	Traser	Pockels - Effekt	Mikrowellenübertragung
Prinzip				
Übertragungs-frequenz	$10^{12} - 10^{15}$ Hz	$10^{12} - 10^{15}$ Hz	$10^{12} - 10^{15}$ Hz	10^{10} Hz
Erreichtes Stadium	Labormuster	Erprobungsmuster	Labormuster	Versuchsaufbau
Literatur	[3]	[1] [4] [9]	[6]	[7]
Abschluß d. Arbeiten	1971	1974 / 1979	1977	1978

	Rogowski - Spule	Brückenwandler	Nullflußwandler
Prinzip			
Übertragungs-frequenz	50 Hz	50 Hz	0... 32 kHz
Erreichtes Stadium	Labormuster	Erprobungsmuster	in Fertigung (Allfrequenzstromwandler)
Literatur	[5] [8]	[10] [11] [12] [13]	[19] [20]
Abschluß d. Arbeit	1975	1987	1987

Gemessen an 20 Jahren Grundlagenforschungstätigkeit erscheint die Anzahl der aus dieser Forschungstätigkeit hervorgegangenen und produzierten Wandler (eine Baureihe) und der Erprobungsmuster (mindestens 1/2 Jahr unter Netzbedingungen im Einsatz) gering. Es ist aber nicht zu verkennen, daß gerade die Untersuchung einer Vielzahl von Varianten und Verfahren, von denen einige nicht weiter verfolgt wurden, die Realisierung dieser und künftiger Lösungen ermöglichte. Die Erkenntnisse, die hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit, der Hilfsenergieversorgung, der Zuverlässigkeit bestimmter Teilbaugruppen gewonnen wurden, sind Grundlage für weitere Arbeiten. Teillösungen aus nichtkonventionellen Wandlern sind zumindest als Konzept in andere Geräte eingeflossen, z.B. die Grundschaltung des rückspeisefesten Leistungsverstärkers des Brückenwandlers als Meßstromquelle für das rechnergestützte Magnetmeßgerät „MAGMES".

3. Wie geht es weiter?

Es wird auch in Zukunft kaum einen generellen „Ersatz" des Meßtransformators durch nichtkonventionelle Wandler geben. In den kommenden Jahren wird der konventionelle Wandler, wenn auch anders dimensioniert, das Hauptglied zur Meßwerterfassung in der Elektroenergieversorgung bleiben. Die Sekundärtechnik wird hingegen zunehmend auf eine rechnergestützte Meßwertverarbeitung übergehen. Das bedeutet, daß das standardisierte Ausgangssignal eines Wandlers nochmals umgesetzt, d.h. digitalisiert werden muß. Der Wandler an sich kann leistungsarm dimensioniert werden und — eine digitale Meßwertübertragung auf der Distanz Wandler/Warte vorausgesetzt — ist er kostengünstig für hohe Systemspannungen und großen Dynamikbereich dimensionierbar. Das Gesamtsystem ist dann wieder ein nichtkonventioneller Meßwandler im Sinne der Definition.

Obwohl die Aufgabenstellung — Schaffung einer dem Wandler zugeordneten Zusatzbaugruppe — trivial erscheint, sind doch noch umfangreiche Untersuchungen bis zur Einführung einer neuen „Sensortechnik" erforderlich.

Kriterium ist nach wie vor das Hilfsenergieproblem. Mit der Senkung des Hilfsenergiebedarfs für die elektronischen Baugruppen einerseits und der damit verbundenen Möglichkeit, neue Prinzipien zur Hilfsenergiebereitstellung andererseits einsetzen zu können [14] [15], sind Lösungen denkbar, die die Hilfsenergie gleich einem konventionellen Wandler aus dem Meßstromkreis entziehen (Bild 3) [16]. Eine entsprechende Anordnung befindet sich seit längerem in Erprobung. Hierbei werden die in elektrischen Betriebsmitteln vorhandenen kapazitiven Beläge zur Speisung der Baugruppen und zur Gewinnung des Meßwertes „Spannung" mit genutzt. Die Übertragung dieses Prinzips zur Versorgung von Baugruppen zur Strommessung bietet sich an, obgleich dann die Stützung der Hilfsenergieversorgung durch externe, aber leistungsschwache Quellen notwendig wird.

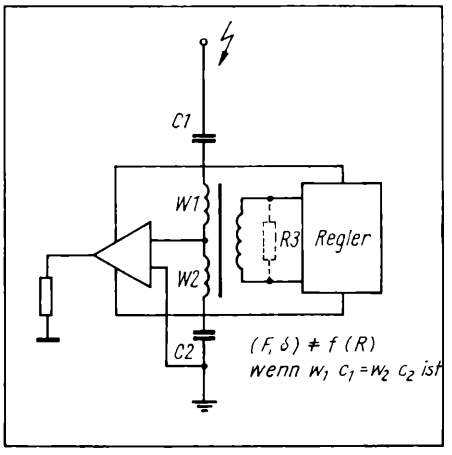
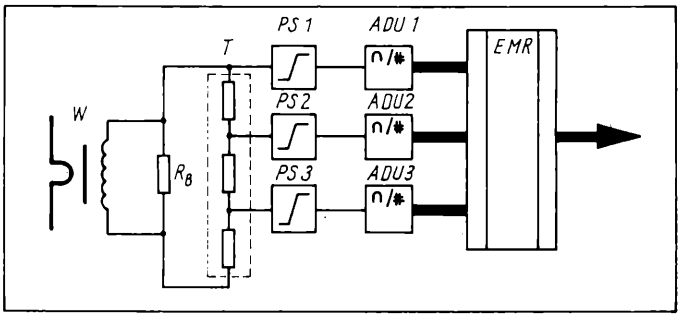


Bild 3
Hilfsenergiegewinnung aus kapazitiven Belägen (z. B. tan-Folie eines Stromwandlers)

Bild 4
ADU-Umsetzer hoher Umsetzbreite
W konventionelle Wandler; R_B Bürde; t binärgestufter Teiler; PS1 bis PS3 Pegelstufen; ADU 1 Umsetzer Meßbereich; ADU2/ADU3 Umsetzer Schutzbereich; EMR Einchipmikrorechner



Ein anderes Problem ist die Digitalisierung der Wandlerausgangsgrößen. Auf Grund des großen Dynamikbereichs von Stromwandlern reichen Analog-Digital-Umsetzer mit Umsetzbreiten von 10 oder 12 bit nicht aus. Simulation des Fehlerganges des Effektivwerts einer Anordnung Analog-Digital-Umsetzung, serielle Übertragung mit etwa 20 kBaud und Digital-Analog-Umsetzung, nach erfolgter Parallelisierung des empfangenen Signals für einen 10-bit-Umsetzer mit Rechenprogramm zeigt, daß es möglich ist, bereits mit einem 10-bit-Umsetzer den Meßbereich eines Stromwandlers hinsichtlich der Genauigkeit befriedigend zu quantisieren. Charakteristisch ist für alle linearen Quantisierungsverfahren, daß die Auflösung um so größer ist, je weiter der Umsetzer ausgesteuert wird. Standards für Wandler definieren jedoch nur einen Fehlergang innerhalb des Meßbereiches und geben als Aussteuerkriterium für die obere Grenze einen effektiven Fehler an. Das bedeutet, daß Umsetzer höherer Bitbreite, die erheblich teurer sind und wesentlich mehr Hilfsenergie benötigen, eigentlich gar nicht ausgenutzt werden. Im Meßbereich (etwa 10 bit) erhöht sich die Auflösung nicht: im Schutzbereich, in dem die Auflösung nicht erforderlich ist, wird ein kleiner Fehler realisiert, der in Anbetracht des Fehlerganges des vorgeschalteten Geberwandlers nicht benötigt wird.

Eine mögliche Lösung zur breiten Umsetzung von Wandlerausgangssignalen mit Umsetzern kleiner Bitbreite ist die Verwendung mehrerer Umsetzer mit kleiner Umsetzbreite (Bild 3), die unterschiedliche Eingangsgrößen erhalten, und die Auswahl des für den Aussteuerbereich gültigen Ausgangssignals mit einem speziellen Einchipmikrorechner [17]. Damit ist es möglich, die Forderungen nach hoher Genauigkeit im Meßbereich und hoher Dynamik zu befriedigen. Nicht zu unterschätzen ist die Möglichkeit der gleichzeitigen Überwachung der Analog-Digital-Umsetzer hinsichtlich ihrer Funktionstüchtigkeit. Das wird dadurch ermöglicht, daß ein Teil des Umsetzer-Bitmusters mit dem größeren Teilerfaktor (Schutzbereich) mit dem des vorgelagerten Umsetzers übereinstimmen muß.

Die Entwicklung kann nicht losgelöst von den Forderungen der Netzschutztechnik erfolgen. Noch bestehen keine einheitlichen Auffassungen über die Gestaltung des binärcodierten Ausgangssignals und über die Übertragungsparameter eines derartigen Meßwertumsetzers. Dieses Problem kann nicht national gelöst werden und wird noch lange bis zur endgültigen Klärung benötigen. Nicht die sich ständig weiterentwickelnde Mikroelektronik mit den großen Möglichkeiten darf und kann künftige Parameter bestimmen, vielmehr sind weitsichtige Empfehlungen für die Gestaltung eines kompatiblen Ausgangssignals zu erarbeiten, die noch lange Zeit unabhängig von der aktuellen Hardwarelösung Gültigkeit haben.

Literatur

[1] *Ermisch, J.:* Ein Beitrag zur Beurteilung und Möglichkeiten des Einsatzes nichtkonventioneller Meßwandler und der Grenzen für eine Verdrängung klassischer Meßtransformatoren. Dissertation B. Technische Universität Dresden 1984

[2] *Muoton, L.*, u. a.: Non Conventional Current and Voltage Transformers. CIGRE Study Commitee No. 34 (Protection), International Conference an Large Voltage Electric Systems

[3] *Bastian, P.:* Beitrag zum Übertragungsverhalten magnetooptischer Stromwandler. Dissertation A. Technische Universität Dresden 1971

[4] *Ermisch, J.:* Ein Beitrag zur Konzipierung eines Meßwandlers zur optoelektronischen Meßwertübertragung für den Einsatz in Elektroenergiesystemen und in der Hochspannungsprüftechnik. Dissertation A. Technische Universität Dresden 1974

[5] *Binder, N.; Lengyel, K. H.:* Zur Meßwertverarbeitung für Schutzzwecke im Elektroenergiesystem. Dissertation A. Technische Universität Dresden, 1975

[6] *Möbius, Ch.:* Beitrag zum Übertragungsverhalten elektrooptischer Stromwandler. Dissertation A. Technische Universität Dersden 1977

[7] *Milde, M.:* Ausnutzung verschiedener Arten der Trägerfrequenzen zur Strommessung in Hochspannungsnetzen. ELEKTRIE, Berlin 32 (1978) 6, S. 330–331

[8] DD; WP 139673; Int. Cl. G 01 R 202876. Schaltungsanordnung zur Strommessung mittels magnetischem Spannungsmesser. *Ermisch, J.; Kunckel, K.-H.*, 16. 01. 1980

[9] *Hauptmann, M.:* Probleme bei der Verarbeitung leistungsarmer Meßsignale mit optischer Meßwertübertragung in Schaltanlagen der Elektroenergieversorgung. Dissertation A, Technische Universität Dresden, 1979

[10] *Schwarz, H.:* Beitrag zum Betriebsverhalten und zur Anwendung des Brückenstromwandlers für Meßzwecke. Dissertation A, Technische Universität Dresden, 1987

[11] *Brendler, W.; Ermisch, J.:* Elektronische Verstärker in neuartigen Stromwandlern für das Elektroenergiesystem. Wiss. Z. Techn. Univers. Dresden 30 (1981) 3, S. 309–315

[12] DD; WP 157981; Int. Cl. G 01 R 217290. Meßanordnung für elektrische Ströme. *Brendler, W.; Ermisch, J.*, 30. 11. 1979

[13] EP-PS 0029903; Int. Cl. G 01 R 80106273. 8. Meßanordnung für elektrische Ströme. *Brendler, W.; Ermisch. J.*, 14. 03. 1984

[14] DD; WP 225538; Int. Cl. H 01 F 2604517. Einrichtung zur Bereitstellung von Hilfsenergie. *Brendler, W.; Ermisch, J.; Hoppadietz, F.*, 29. 02. 1984

[15] *Buchholz, D.*, u. a.: Überspannungsmeßgerät. ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, S. 219–221

[16] *Brendler, W.; Ermisch, J.; Hoppadietz, F.:* Zur Versorgung elektronischer Baugruppen für die Meß- und Schutztechnik im Elektroenergiesystem. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 5, S. 183–185

[17] DD; WP 262522; Int. Cl. H 03 M 3035245. Verfahren und Schaltungsanordnung zur Quantisierung von bebürdeten Stromwandlern. *Ermisch, J.; Brendler, W.*, 04. 06. 1987

[18] *Ermisch, J.; Brendler, W.:* Mikrorechnergesteuertes Spannungsüberwachungssystem. 11. Wissenschaftliche Konferenz der Sektion Elektrotechnik, Themengruppe M, Tagungsband S. 42

[19] *Hertwig, N.:* Ein Beitrag zur Theorie und technischen Realisierung der potentialgetrennten Meßwerterfassung von Strömen stark unterschiedlichen Zeitverlaufs im Bereich Gleichstrom bis dynamisch sehr schnell veränderlicher Strom. Dissertation A. Technische Universität Dresden 1987

[20] *Ermisch, J.; Hertwig, N.:* Potentialgetrennte Meßwerterfassung der Stromstärke in einem weiten Frequenzbereich. ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 1, S. 14–16

[21] DD; WP 228644; Int. Cl. G 01 R 2689342. Anordnung zur Messung von Gleichströmen. *Ermisch, J.; Hertwig, N.; Roseburg, D.*, 01. 11. 1984

EA 6010

Höhere Effektivität beim Einsatz von Elektromotoren angestrebt

Wie die elektrischen Maschinen künftig effektiver, mit höchster Wirkung und sparsamstem Energieverbrauch einzusetzen sind, darüber wurde auf einem zentralen Seminar des Ministerrates im Mai in Dresden unter Leitung des Ministers für Elektrotechnik und Elektronik, *Felix Meier*, beraten. Der Erfahrungsaustausch von General- und Betriebsdirektoren, Wissenschaftlern und Spezialisten verdeutlichte, daß eine hohe Wirtschaftlichkeit durch engere Zusammenarbeit von Herstellern und Nutzern sowie durch den Einsatz von Rechentechnik zu erreichen ist. Erforderlich seien rechnergestützte Projektierungsmethoden, eine kontinuierliche Instandhaltung und ein höheres Leistungsniveau der Reparaturkapazitäten, sagte der Minister. Es müsse erreicht werden, die Auslastung von Motoren von gegenwärtig 60 auf 70 bis 80% zu erhöhen. Das Kombinat Elektromaschinenbau, so berichtete Generaldirektor *Heiner Rubarth*, habe Software für die anwendungsgerechte Auswahl von Elektromotoren entwickelt, die ab 1989 in der Elektrotechnik/Elektronik verbindlich angewendet wird und deren Nutzung auch in anderen Zweigen Reserven erschließen hilft. Das Kombinat stelle sich den neuen Anforderungen mit dem Ziel, höchste ökonomische Ergebnisse für die Volkswirtschaft zu erreichen. In einer Ausstellung zum Seminar wurde gezeigt, wie durch den Einsatz eines neuen Motors für Waschmaschinen jährlich 200 Tonnen Walzstahl eingespart und der Energieverbrauch gesenkt wird. (ADN/El)

Stromwandler – Stand der Entwicklung

K.-H. Kunckel, KDT, Dresden

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* zum 65. Geburtstag

Es werden Stromwandler betrachtet, deren Funktionsprinzip durch die im Idealzustand gegebene Gleichheit einer primären und sekundären Durchflutung

$$i_1 \cdot w_1 - i_2 w_2 = 0$$

beschrieben ist. Die Analyse beruht auf einer Auswertung der nationalen und internationalen Fachpresse für den Zeitraum der letzten 30 Jahre. Der Rechercheumfang ist im Anhang 1 zusammengestellt. Mehr als 500 Arbeiten wurden ausgewertet. Es sind zunächst folgende Hauptaspekte der wissenschaftlich-technischen Entwicklung zu erkennen (Bilder 1a bis 1 d):

1. Die Entwicklung des Fachgebietes verlief sicher in weitaus weniger spektakulären Bahnen als das vergleichsweise bei der Mikroelektronik der Fall ist. Dennoch ist eine Häufung der Aktivitäten im Zeitraum 1965 bis 1980 nicht zu verkennen.
2. Etwa 60% aller Arbeiten haben 3 Gebiete der Stromwandlertechnik zum Hauptgegenstand:
— Nichtkonventionelle Meßwerterfassung mit rund 30% aller Arbeiten und einer deutlichen Dominante im Zeitraum 1970 bis 1974 (Bild 1b)
— Transientes Verhalten der Wandler bei der Übertragung von verlagerten Kurzschlußströmen sowie Einsatz von linearisierten Kernen mit etwa 20% aller Arbeiten und einer deutlichen Dominante im Zeitraum 1975 bis 1979 (Bild 1c)
— Einsatz von Gießharz im Wandlerbau mit rund 10% aller Arbeiten und einer deutlichen Häufung Mitte der sechziger Jahre (Bild 1d).
3. In den verbleibenden etwa 40% aller Arbeiten stehen folgende Fragen im Vordergrund:
— Theorie, Entwurf und Berechnung der stationären Eigenschaften im Nenn- und Überstromgebiet einschließlich Fremdfeldbeeinflussung und Sonderprobleme der Anwendung
— Bauformen und konstruktive Probleme für die verschiedensten Spannungsebenen sowie Probleme des klassischen Gleichstromwandlers
— Probleme des Isoliervermögens, Stromwandler für gekapselte SF_6-Anlagen, Hochspannungsprüftechnik einschließlich Prüfvorschriften
— Ermittlung der meßtechnischen Eigenschaften von Stromwandlern für Meß- und Schutzzwecke einschließlich Fragen der Normung
— Technologische Probleme und Fortschritte bei der Wandlerfabrikation
— Trendanalysen unter Berücksichtigung von Primär- und Sekundärtechnik.

Für den aktuellen Erkenntnisstand des Fachgebiets lassen sich die folgenden Aussagen formulieren.

1. Theorie und Berechnung

Das Verhalten induktiver Stromwandler im Nennstromgebiet wird beschrieben durch den Stromfehler F_i und den Fehlwinkel δ_i, deren Abhängigkeit von den elektrischen, magnetischen und geometrischen Wandlerparametern durch die Hauptentwurfsgleichungen gegeben ist:

$$F_i = -\frac{S_2 l_k}{\sqrt{2}\,\pi f A_k (I_1 w_1)^2}\,\frac{1}{\mu_T}\cos(\varphi_0 - \varphi_2)\cdot 100\%,$$

$$\delta_i = +\frac{S_2 l_k}{\sqrt{2}\,\pi f A_k (I_1 w_1)^2}\,\frac{1}{\mu_T}\sin(\varphi_0 - \varphi_2)\cdot 3440'.$$

Doz. Dr. sc. techn. *Karl-Heinz Kunckel* ist Hochschullehrer an der Technischen Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik, Bereich Elektrische Maschinen.

Für die Ermittlung der Abhängigkeit der für Wandler typischen Größen μ_T und φ_0 vom Scheitelwert der Induktion benutzt man die an fertigen Kernen gemessenen Kennlinien.
Das meßtechnische Verhalten konventioneller Stromwandler im stationären Überstromgebiet wird durch den Sicherheitsfaktor FS bzw. den Genauigkeitsnenngrenzfaktor P beschrieben, die auf der Grundlage des Gesamtfehlers $F_{gü}$ definiert sind. Es gilt näherungsweise:

$$FS, P = \frac{\sqrt{2}\,\pi f w_2 A_k I_{2n} \hat{B}_ü}{(1 - F_{gü}) S_{2n}}.$$

Der Scheitelwert der Induktion im Überstromgebiet $\hat{B}_ü$ wird zweckmäßigerweise nach einem graphischen Verfahren aus einer für das Überstromgebiet gültigen Materialkennlinie bestimmt. Für die Nachrechnung des thermischen Nennkurzzeitstroms I_{th} ist die Kenntnis des Effektivwertes des Sekundärstroms im Überstromgebiet als Funktion von I_1 entscheidende Voraussetzung. Die Berechnung ist bei vereinfachender Approximation der Magnetisierungscharakteristik der Kerne möglich und in normierter Form

$$\frac{I_2 \hat{B}_n}{I_{2n} B_{SATT}} = v\,\frac{I_1 \hat{B}_n}{I_{1n} B_{SATT}} = vF$$

darstellbar. Der Faktor F gibt dabei das Stromverhältnis I/I_n als Vielfaches des Sättigungsverhältnisses $B_{SATT}/\hat{B}_n$ an. Für $F < 1$ gilt immer $v = 1$.

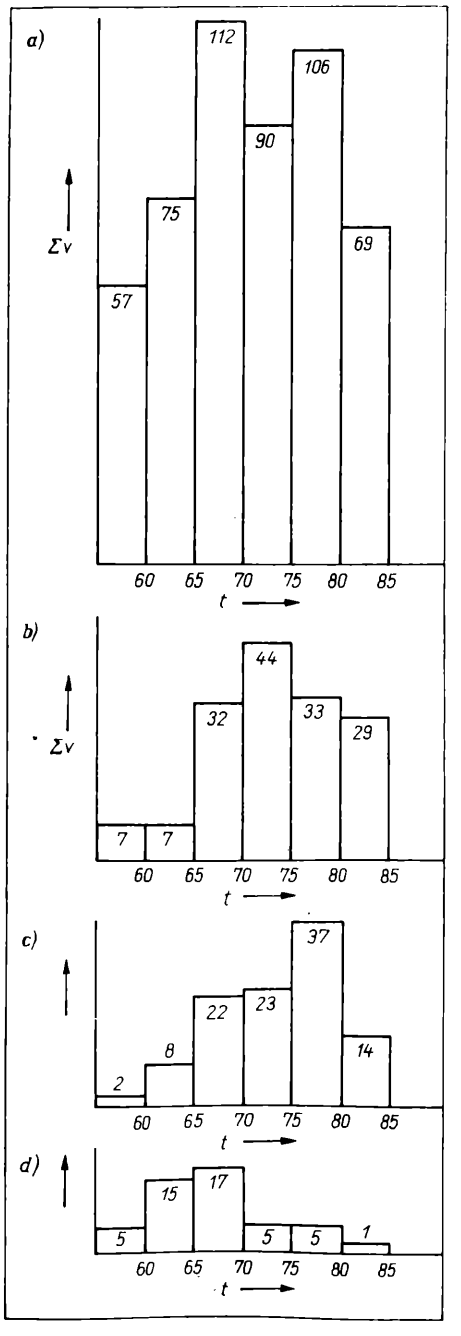


Bild 1
Auswertung der Publikationstätigkeit
a) Gesamtüberblick
b) Nichtkonventionelle Stromwandler
c) Transientes Verhalten
d) Einsatz von Gießharzen

Im Fall eines Erd- bzw. Kurzschlusses im Netz wird in den Wandler gegebenenfalls ein vollverlagerter Primärstrom, dessen Gleichanteil mit der Netzzeitkonstante abklingt, eingespeist. Dadurch tritt im Kern eine transiente Induktion auf, deren Wert weit höher liegt, als bei der Übertragung eines stationären Kurzschlußstromes. Bei der automatischen Wiedereinschaltung kann es im schlimmsten Fall dazu kommen, daß, verursacht durch den ersten Fehler, erneut ein solcher Strom gleicher Polarität auf den Wandler aufgeschaltet wird, der zudem noch eine gewisse Restinduktion hat. Muß gesichert werden, daß auch dabei der Wandler nicht in die Sättigung gerät, ist er nach der transienten Überstromzahl n_{tr} zu bemessen, die sich näherungsweise mit

$$n_{tr} = \frac{I_{1K}}{I_{1n}} (\omega T_N + 1) (1 + K_R)$$

bestimmen läßt.
Der Faktor K_R berücksichtigt das Remanenzverhalten des Wandlerkerns.

2. Bauformen

Für Innenraumschaltanlagen mit Isolationsspannungen $\leqq 72{,}5$ kV werden heute ausschließlich Stromwandler mit Epoxidharzisolierungen auf Biphenol-A-Basis hergestellt, nicht zuletzt auch deshalb, weil dieses Harz gleichzeitig ein fast idealer Konstruktionswerkstoff ist. Für Isolationsspannungen bis 245 kV werden von verschiedenen Herstellern Hybridformen mit harzgetränkter Weichpapierisolierung, für Freiluftanlagen mit klassischem Porzellanüberwurf und in Silikonöl getaucht, angeboten. Oberhalb 245 kV besteht mit den gegenwärtigen Harzen die Gefahr des Wärmedurchschlages. Reine Gießharzwandler für Außenanlagen sind unter Verwendung zykloaliphatischer Epoxidharze mit Aluminiumhydroxid als Füllstoff seit etwa 20 Jahren im Einsatz.
Isolationsspannungen ab 123 kV bis zu höchsten Werten sind die Domäne für Stromwandler mit der klassischen Öl/Weichpapierisolierung. Man unterscheidet 3 Grundformen: Stützerstromwandler, Topfstromwandler und Kopfstromwandler. Topf- und Kopftypen sind wegen des wesentlich geringeren Ölvolumens heute deutlich favorisiert, und unter diesen wiederum ist der Trend zum Kopfstromwandler aufgrund der nahezu unbegrenzten Kurzschlußfestigkeit hervorzuheben. Nachteilig ist lediglich die begrenzte Anzahl der Kerne und damit im Zusammenhang stehend die Realisierung der erforderlichen Umbruchfestigkeit. Zur Potentialsteuerung geht man zwei Wege: wenige Steuerbeläge mit breiten Randelektroden oder eine große Anzahl von Steuerbelägen mit hinreichend kleinem Abstand untereinander. Zum Ölabschluß werden in modernen Konstruktionen hermetisch schließende Faltenbälge aus inoxidablem Material verwendet, womit quasi völlige Wartungsfreiheit erreicht wird.
Für SF_6-isolierte gekapselte Schaltanlagen ist die Strommessung im Vergleich zur Spannungsmessung kein besonderes konstruktives Problem. Häufig wird der Stromwandler als Einleiterwandler in der druckfesten Kapselung direkt untergebracht. Hauptisolierung ist dabei das gasförmige Dielektrikum. Zwei Konstruktionsformen sind relevant:
1. Kerne und Sekundärwicklungen werden als zylindrischer Block auf ein Tragrohr gegossen und 2. die tragende Konstruktion wird durch den mit einem leitenden Metallbelag versehenen Gießharzkörper selbst übernommen. Die Unterbringung des Stromwandlers außerhalb der Druckkapselung ist ebenfalls möglich.

3. Isolierung

Die Isolierung elektrotechnischer Betriebsmittel unterliegt der Dauerbeanspruchung von Spannungen mit Betriebsfrequenz und gelegentlichen Überspannungen bei Schalthandlungen und Störungen (innere Überspannungen) sowie bei Blitzeinschlägen (äußere Überspannungen). Bei Stromwandlern ist dabei besonders zu beachten, daß die wechselnden Betriebsströme als auch die Fehlerströme bei Erd- oder Kurzschlüssen zu sehr unterschiedlichen thermischen und mechanischen Belastungen des Dielektrikums führen. Diese Beanspruchungen sind bekannt. Ihnen zugeordnet werden — weitestgehend international einheitlich — in Abhängigkeit von der Isolationsspannung, Isolationsklasse und Koordinationsform entsprechende Prüfungen mit Wechselspannung, Blitzspannung und Schaltspannung sowie neuerdings Teilentladungsprüfungen.

Prüfungen mit Wechselspannung werden mit überhöhten Prüfspannungswerten — gegenüber der Betriebsspannung — bei kurzer Beanspruchungsdauer durchgeführt. Es gibt — abhängig von der kurzen Beanspruchungsdauer — zwei Trends:

1. Die Höhe der Spannung richtet sich nach den (inneren) Überspannungen, die Zeit (1 min) nach der Prüf- und Meßtechnik der Spannung (z. B. Einstellzeit der Instrumente)
2. Höhe und Zeit ergeben sich aus der Lebensdauerkennlinie

$$U_d = k\, t_d^{-\frac{1}{n}}$$

n Lebensdauerexponent.

Dann wird ein Wertepaar nach einem vergleichbaren Lebensdauerverbrauch gewählt.
Fortschritte sind durch die weitere Erforschung der Teilentladungsmeßtechnik und die Deutung ihrer Meßergebnisse zu erwarten. Bei Prüfungen mit Wechselspannung von Stromwandlern unter Regen bzw. mit Fremdschichten ist zu bemängeln, daß sie häufig bei ausgebautem Aktivteil erfolgen, weil dann die innere Wärmequelle fehlt, die die Schmutzablagerung, die Befeuchtung und damit den Überschlag beeinflussen kann.
Prüfungen mit Blitzspannung zum Nachweis des ausreichenden Isoliervermögens gegen äußere Überspannungen werden mit Prüfspannung in Standardform 1,2/50 durchgeführt. Trotz Festlegung einer einzigen Impulsform wird — bezieht man sich auf den Außenüberschlag — physikalisch damit keine Einschränkung gemacht. Prüfungen mit Schaltspannung sind oberhalb einer Isolationsspannung von 300 kV notwendig. Die Notwendigkeit leitet sich aus dem Minimum der spezifischen Überschlagspannung bei diesen Stirnzeiten und Schlagweiten von mehreren Metern ab. International wird dann empfohlen, diese Prüfung als Abnahmeprüfung durchzuführen und auf die Prüfung mit Wechselspannung zu verzichten.
Teilentladungsprüfungen an Stromwandlern gehören heute zum Stand der Technik, und es existieren, durch IEC empfohlen, detaillierte Angaben über die zu verwendende Prüfschaltung, die Art und die Höhe der Vorbelastung und die zulässigen Grenzwerte der scheinbaren Ladung. Einigkeit besteht in der Fachwelt bezüglich der Einschätzung der grundsätzlichen Bedeutung dieser Messungen; strittig sind die Fragen der zweckmäßigen Vorbelastung und die Festlegung der zulässigen Grenzwerte. Zweckmäßig wäre sicherlich eine Vorbelastung mit Schaltspannung bei anliegender Betriebswechselspannung, was jedoch einen hohen Aufwand für die Prüfschaltung bedingt. Noch problematischer ist die Festlegung von noch zulässigen Grenzwerten, da nur scheinbare Ladungen gemessen werden, die in keinem strengen Zusammenhang mit den tatsächlichen Ladungen am Fehlerort im Dielektrikum stehen.

4. Normung und Vorschriften

Mit der Einführung standardisierter Parameter für den transienten Betrieb von Stromwandlern nach IEC wurde eine wesentliche Lücke im Vorschriftenwerk geschlossen und der technischen Entwicklung der Primärtechnik und der Netzführung sowie der Netzschutztechnik Rechnung getragen. Besonders hervorzuheben sind:

Festlegung standardisierter Betriebszyklen im transienten Betrieb
F — 0 (einmalige Fehleraufschaltung)
F — 0 — F — 0 (zweimalige Fehleraufschaltung)
Einführung neuer Klassen für den transienten Betrieb
TPX (überdimensionierter Wandler ohne Luftspalte)
TPY (Antiremanenzwandler)
TPZ (linearisierter Wandler).

Normalisierung neuer, momentaner Fehlergrößen für die neuen Klassen während der spezifizierten Betriebszyklen
momentaner Scheitelfehler $\hat{\varepsilon}$
momentaner Scheitelfehler der Wechselstromkomponente $\hat{\varepsilon}_{ac}$.

5. Nichtkonventionelle Meßwerterfassung

Zur Abgrenzung der nichtkonventionellen zu den konventionellen Stromwandlern wird in der Literatur folgende Definition vorgeschlagen: „Konventionelle Stromwandler sind induktive Stromtransformatoren, die die von einem Meßwandler geforderten Funktionen Meßwerterfassung und Umformung, Potentialtrennung und Bereitstellung des Leistungsbedarfs für die angeschlossene Bürde ohne Hilfsenergiequelle erfüllen. Nichtkonventionelle Stromwandler sind solche, die dazu eine oder mehrere Hilfsenergiequellen be-

nötigen, die ganz oder teilweise die zur Erfüllung der genannten Funktionen notwendige Energie liefern. Nichtkonventionelle Stromwandler heißen aktiv, wenn Hilfsenergie auch auf Potential nötig ist und passiv, wenn nur auf Wartenpotential Hilfsenergie gebraucht wird."

Unter den nichtkonventionellen Stromwandlern dominieren die passiven Typen und unter ihnen wiederum die, die den Faraday-Effekt zur Modulation eines optischen oder eines Mikrowellenträgersignals nutzen. Das am weitesten ausgebaute Konzept eines Faraday-Stromwandlers ist das mit differentiellem Nachlaufsystem. Es verbindet die Vorteile eines differentiellen mit denen eines gegengekoppelten Systems. Alle Systeme passiver Wandler mit Gegenkopplung zeichnen sich durch Robustheit des Hochspannungsteils und zufriedenstellende Genauigkeit aus. Gemeinsamer Nachteil ist der erforderliche Leistungsverstärker, der neben der Meßleistung auch die notwendige Energie zur Kompensation bereitstellen muß.

Alle Stromwandler mit aktivem Hochspannungsteil zeichnen sich durch folgende Gemeinsamkeit aus: Sie haben keine Gegenkopplung. Das aus einem konventionellen „nichtisoliertem" Stromwandler abgeleitete Meßsignal moduliert hochspannungsseitig ein Trägersignal und wird über eine optische Strecke (Lichtwellenleiter) auf Erdpotential übertragen. Bevorzugte Modulationsarten sind: PFM, PDM, PPM und PCM. Hauptvorteil aller dieser Konzeptionen ist die erzielbare hohe Genauigkeit und gute Temperaturstabilität. Ihr Hauptnachteil besteht, abgesehen von der potentiell höheren Störanfälligkeit der hochspannungsseitigen Elektronik, im Problem der Hilfsenergiebereitstellung auf Potential.

Eindeutig zu den nichtkonventionellen Stromwandlern zu zählen ist eine Gruppe von Wandlern, die häufig als fehlerkompensierte Stromwandler oder auch Nullflußwandler bezeichnet werden. Primär- und Sekundärspule befinden sich auf einem gemeinsamen magnetischen Kreis, dessen Feld durch einen Sensor erfaßt wird, der einen Operationsverstärker steuert. Der O-V-Ausgang speist die Bürde und die Sekundärwicklung. Eine besondere Ausführungsvariante dieses Typs ist der Brückenstromwandler. Fehlerkompensierte Stromwandler ermöglichen in Abhängigkeit von der Physik des Feldsensors den Aufbau von Gleichstromwandlern oder den Einsatz minderwertiger weichmagnetischer Kernmaterialien für Wechselstromwandler bei gleichbleibender Genauigkeit.

6. Sonderprobleme

Der ökonomische Zwang zur rationellen automatischen Prüfung von Stromwandlern initiierte die Entwicklung moderner Meßeinrichtungen zur Fehlerbestimmung von Stromwandlern. Den meisten Konzepten liegt das Differenzverfahren zugrunde. Die Differenz der Sekundärströme des Prüflings und eines „fehlerfreien" Normalwandlers, die die Fehlerinformationen F_i und δ_i enthält, wird durch einen elektronischen Vektormesser, dessen Kernstück zwei Sample-and-hold-Verstärker sind, phasenempfindlich ausgewertet und digital angezeigt.

Alle Bemühungen der betrieblichen Starkstrommeßtechnik waren und sind darauf gerichtet, den Stromwandler in dem durch den Anwender geforderten Dynamikbereich als lineares Bauelement zu dimensionieren. Neueste Forschungen lassen erkennen, daß durch die Fortschritte auf dem Gebiet der Mikroelektronik in absehbarer Zeit Einchiprechner für On-line-Anwendung angeboten werden, die es ermöglichen, für den Stromwandler eine beliebige, aber eindeutig definierte nichtlineare Kennlinie zuzulassen und mit ihrer Hilfe mit dem in den Wandler oder die Sekundäreinrichtung integrierten Rechner auf den tatsächlichen Primärstromverlauf zurückzurechnen.

Der nationale Beitrag zum Stand des Fachgebiets wird durch die Dissertationsschriften, die im Anhang 2 zusammengestellt sind, dokumentiert. Im Rahmen der Hochschulforschung der DDR wurden wesentliche Beiträge zur Erweiterung der Kenntnisse über das Betriebsverhalten konventioneller Stromtransformatoren geleistet. Die Ergebnisse entsprechen dem internationalen Niveau für folgende Teilgebiete:

— Theorie und Berechnung des Stromwandlerverhaltens im Nennstromgebiet

— Analytische Beschreibung des Wandlerverhaltens im stationären Überstromgebiet

— Fremdfeldbeeinflussung von Ringkernstromwandlern

— Konventionelle Stromwandler in Drehstromschaltungen und deren Verhalten bei unsymmetrischen Fehlern im Drehstromnetz

— Zusammenwirken konventioneller Stromwandler mit elektronischen Netzschutzeinrichtungen

— Analoge Modellnachbildung und meßtechnische Erfassung von Betriebsparametern.

Besonders bedeutsam ist der nationale Beitrag bei der Erweiterung des Wissens über Möglichkeiten der nichtkonventionellen Strommessung. Der Wert der Einzelergebnisse zu konkreten technischen Anordnungen wird durch die programmatische Behandlung des Gesamtkomplexes dokumentiert und repräsentiert sich wie folgt:

— Technikrelevante Aufbereitung der Physik optischer Modulatoren und Erarbeitung einer problemorientierten Theorie der externen und internen Lichtmodulation

— Untersuchung passiver und aktiver nichtkonventioneller Stromwandler (Faraday-, Pockels-, Mikrowellenwandler und Modifikationen des Traser-Wandlers)

— Vervollkommnung von Theorie und Technik fehlerkompensierter Stromwandler (Nullflußwandler, Brückenwandler)

— Behandlung von Problemen der Hilfsenergiebereitstellung unter besonderer Berücksichtigung der Erfordernisse aktiver Wandlertypen.

Anhang 1: Rechercheumfang

1. Brown-Boveri-Mitteilungen, Schweiz
2. Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, Schweiz
3. Elektricestvo, UdSSR
4. ELEKTRIE, DDR (bis 1959 Deutsche Elektrotechnik)
5. Elektrizitätswirtschaft, BRD
6. Elektrotechnicky obzor, ČSSR
7. Elektrotechnik und Maschinenbau, Österreich
8. Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin/West (bis 1978 ETZ-A)
9. ETZ-Archiv
   Archiv für elektrische Energietechnik der ETZ, Berlin/West (bis 1978, ETZ-B)
10. Elektrottechnica, Italien
11. IEEE Transactions on Power apparatus and systems (bis 1984), USA
12. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Großbritannien (bis 1979: Part: Power Record, ab 1979: Part B: Electric Power Application, Part C: Generation, Transmission and Distribution)
13. Przegląd elektrotechniczny, Polen
14. Révue générale de l'électricité, Frankreich (bis 1965 Bulletin de la Societé Française des Electriciens)
15. Siemens Energietechnik, Berlin/West (bis 1979 Siemens-Zeitschrift)
16. Technische Mitteilungen AEG-Telefunken, Berlin/West (bis 1967 AEG-Mitteilungen, 1982 eingestellt)
17. Technisches Messen, BRD (bis 1978 Archiv für Technisches Messen)
18. Sonstige Veröffentlichungen (wesentliche Aufsätze zum Fachgebiet im Recherchezeitraum aus Zeitschriften und Sonderheften, die nicht systematisch gesichtet wurden)

Anhang 2: In der DDR angefertigte Dissertationen zur Thematik „Stromwandler"

1. *Brendler, W.:* Ein Beitrag zur Vorausbestimmung der Fehler wechselstromvormagnetisierter Stromwandler. Dissertation A. TH Dresden 1958
2. *Brendler, W.:* Die Meßwertumformung von Wechselströmen mittels Stromwandler, deren Genauigkeit und Fehlerermittlung durch analoge Meßverfahren. Habilitation, TU Dresden 1967
3. *Schröter, H.:* Beitrag zur Meßwertübertragung mit Hilfe extern modulierten Lichtes. Dissertation A, TU Dresden 1968
4. *Stieb, S.:* Beitrag zur Beurteilung des Übertragungsverhaltens von Stromwandlern für stationäre und nichtstationäre Ströme. Dissertation A, TU Dresden 1970
5. *Bastian, P.:* Beitrag zum Übertragungsverhalten magnetooptischer Stromwandler. Dissertation A, TU Dresden 1971
6. *Kutzer, M.:* Die Beeinflussung der Fehlerkurven von Ringkern-Stromwandlern durch parallel zur Ringkernachse verlaufende Fremdleiterströme. Dissertation A, TU Dresden 1971
7. *Ermisch, J.:* Beitrag zur Konzipierung eines Meßwandlers mit optoelektronischer Meßwertübertragung für den Einsatz in Elektroenergiesystemen und in der Hochspannungs-Prüftechnik. Dissertation A, TU Dresden 1976
8. *Heißrath, M.:* Beitrag zur Auslegung optimaler Modellreihen von Strom- und Spannungswandlern für kleinräumige Mittelspannungsschaltanlagen. Dissertation B, TH Ilmenau 1976
9. *Möbius, Ch.:* Beitrag zum Übertragungsverhalten elektrooptischer Stromwandler. Dissertation A, TU Dresden 1978
10. *Gruhn, G.:* Zur Bestimmung der Kenngrößen von Stromwandlern für den elektronischen Mittelspannungsschutz. Dissertation B, TH Leipzig 1984
11. *Ermisch, J.:* Ein Beitrag zur Beurteilung der Möglichkeiten des Einsatzes nichtkonventioneller Meßwandler und der Grenzen für die Verdrängung klassischer Meßtransformatoren. Dissertation B, TU Dresden 1984
12. *Kunckel, K.-H.:* Zur stationären und dynamischen Abbildungstreue von Stromwandlern — Möglichkeiten und Grenzen. Dissertation B, TU Dresden 1986
13. *Hertwig, N.:* Ein Beitrag zur Theorie und technischen Realisierung der potentialgetrennten Meßwerterfassung von Strömen stark unterschiedlichen Zeitverlaufs im Bereich Gleichstrom bis dynamisch sehr schnell veränderlicher Strom. Dissertation A, TU Dresden 1987
14. *Schwarz, H.:* Beitrag zum Betriebsverhalten und zur Anwendung des Brückenstromwandlers für Meßzwecke. Dissertation A, TU Dresden 1987
15. *Peinelt, W.:* Untersuchungen des magnetischen Feldes im Schenkelkernstromwandler unter Berücksichtigung des Überstromgebiets. Dissertation A, TU Dresden 1988

EA 6011

Korrekte Funktionsweise von Schutzeinrichtungen trotz temporärer Stromwandlersättigung

W. Winkler, Gliwice, VR Polen

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* zum 65. Geburtstag

Seitdem das Problem der transienten Stromwandlersättigung durch das im Kurzschlußstrom auftretende Gleichstromglied und dessen Einfluß auf das Verhalten von schnellen Schutzeinrichtungen an Bedeutung gewonnen hat [1], ist man bemüht, technische Lösungen zu finden, die die Erfassung von Kurzschlüssen auch bei hohen Kurzschlußströmen mit langsam abklingenden Gleichstromkomponenten gewährleisten. Diese Lösungen stützen sich auf zwei grundverschiedene Ideen, von denen eine die Verbesserung der Übertragungseigenschaften der Stromwandler als Zielsetzung hat, die andere dagegen auf der Vervollkommnung der Fehlererfassungskriterien von Schutzeinrichtungen beruht. Der erste Fall initiiert das Streben nach formgetreuer Übertragung des Primärstroms in den Sekundärkreis, der zweite die Ausnutzung aller möglichen Informationen aus dem durch die Wandlersättigung verzerrten Stromverlauf bzw. die Durchführung der Fehlererfassung vor Sättigungseintritt.

Für die formgetreue Übertragung von mit Gleichstromgliedern behafteten Kurzschlußströmen stehen heute überdimensionierte Stromwandler mit geschlossenem Eisenkern (Klasse TPX), wie auch Wandler mit Antiremanenz-Luftspalten (Klasse TPY) und Linearkernen (Klasse TPZ) zur Verfügung [2] [3]. Auch nichtkonventionelle Stromwandler, die auf anderen als dem Transformatorprinzip beruhen, wie z.B. Wandler mit Optokopplern, magnetooptische Farraday-Wandler, Nullflußwandler usw., sind bekannt [4] [5] [6] [7]. Der Einsatz dieser Wandlerarten ist leider nicht immer möglich (z.B. Platzmangel) oder auch wirtschaftlich unakzeptabel.

Bei der Anwendung herkömmlicher Stromwandler mit geschlossenem Eisenkern (Wandlerklasse 5 P bzw. 10 P) kann in vielen Fällen durch die richtige Wahl des tatsächlichen Überstromfaktors eine die Funktionsweise der angeschlossenen Schutzeinrichtung negativ beeinflussende Wandlersättigung vermieden werden [8]. Ist das jedoch nicht der Fall, dann ist — abgesehen von den oben erwähnten Spezialwandlern — die Einführung von entsprechenden Meßverfahren direkt in der Schutzeinrichtung unumgänglich. Im folgenden werden einige dieser, schon in der Praxis erprobten Meßverfahren beschrieben.

1. Meßverfahren zur Gewährleistung des korrekten Verhaltens von Schutzeinrichtungen

1.1. Verfahren zur Fehlererfassung vor Eintritt der Wandlersättigung

Umfangreiche Untersuchungen haben ergeben, daß in extrem ungünstigen Fällen die Wandlersättigung bereits einige Millisekunden nach Kurzschlußeintritt beginnt. Aus diesem Grunde ist man bestrebt, in dieser sehr kurzen Zeit mit unverfälschten Strommeßwerten den Kurzschlußfehler mit ultraschnellen Schutzeinrichtungen zu erkennen und zu lokalisieren, was auf verschiedene Art realisiert werden kann, u.a. durch die Auswertung von transienten Δ-Signalen. Dieses Verfahren geht davon aus, daß die Strom- und Spannungsverläufe am Relaiseinbauort bei Fehlereintritt sprungartig von den fehlerfreien netzfrequenten Werten abweichen (Bild 1).

Es gilt:

$$\Delta i\,(t) = i_{\mathrm{n}}\,(t) - i_{\mathrm{v}}\,(t), \tag{1}$$

$$\Delta u\,(t) = u_{\mathrm{n}}\,(t) - u_{\mathrm{v}}\,(t), \tag{2}$$

wobei $i_{\mathrm{v}}(t)$, $u_{\mathrm{v}}(t)$ die Strom-/Spannungsmeßgrößen vor Fehlereintritt bedeuten, $i_{\mathrm{n}}(t)$, $u_{\mathrm{n}}(t)$ dagegen den Meßgrößen nach Fehlereintritt entsprechen.

Die praktische Anwendung der Δ-Signale in einem ultraschnellen Richtungsvergleichsschutz für Hoch-/Höchstspannungsleitungen wurde ausführlich in [9] beschrieben. In diesem Fall wird das durch (1) beschriebene Stromsignal durch eine in der Schutzeinrichtung angeordneten Abbildimpedanz der geschützten Leitung getrieben, wodurch man nach Fehlereintritt eine Spannungsabweichung $\Delta u_{\mathrm{A}}(t)$ erhält, die zusammen mit der Meßgröße $\Delta u(t)$ nach (2) zur Richtungsbestimmung ausgenützt wird. Als Richtungskriterium dient der Δu_{A}; Δu — Trajektorienverlauf direkt nach Fehlereintritt.

Auf vergleichbar ähnliche Weise erfolgt die ultraschnelle Fehlererfassung im Richtungsvergleichsschutz nach [10]. In dieser Lösung wird nach Überschreiten eines auf Grund der Quellen- und Leitungsparameter festgelegten Schwellwerts die Polarität der Δi- und Δu-Signale unabhängig voneinander bestimmt. Nach einem ganz anderen Verfahren wird die ultraschnelle Erfassung von innenliegenden Kurzschlüssen in Großgeneratoren durch einen modifizierten Differentialschutz durchgeführt [11]. Bild 2 zeigt die Prinzipschaltung dieser Lösung. Es ist grundsätzlich ein stabilisierter Differentialschutz, in dem die Spannung U_{A} dem Differenzstrom I_{A} entspricht, die Spannung U_{s} dagegen dem Stabilisierungsstrom, der aus den beiden Leiterströmen I_1' und I_2' gebildet wird. Durch den Einsatz von 1-ms-Relais RE_{A} und RE wird direkt nach Eintritt des innenliegenden Kurzschlußfehlers ein Auslösesignal S_{A} über die geschlossenen Kontakte K_1 und K_2 abgegeben, das anschließend an ein hier nicht gezeigtes Ausgangsrelais mit Selbsthaltekontakt weitergeleitet wird. Dadurch ist gewährleistet, daß das Öffnen eines der Kontakte K_1 bzw. K_2 infolge Wandlersättigung nach Ablauf einer Millisekunde ab Fehlereintritt den eingeleiteten Abschaltvorgang nicht mehr unterbricht. Durch die entsprechende Wahl der Parameter der Meßkreise und Ansprechwerte der Schutzeinrichtung wird auch das richtige, stabile Verhalten des Schutzes bei außerhalb des Schutzbereichs liegenden Kurzschlüssen mit Wandlersättigung gesichert.

1.2. Verfahren zur Sicherstellung der selektiven Funktionsweise des Schutzes trotz Wandlersättigung

1.2.1. Differentialschutz

Der klassische, stabilisierte Strom-Differentialschutz ist gegenwärtig die Standardeinrichtung für die Erfassung von Kurzschlüssen in Synchrongeneratoren, Transformatoren, Hochspannungsmotoren großer Nennleistung und teilweise auf Sammelschienen und HS-Leitungen. Der Schutzbereich ist in all diesen Fällen auf das entsprechende Schutzobjekt beschränkt, d.h. daß der Schutz keinesfalls bei außerhalb der festgelegten Schutzzone auftretenden

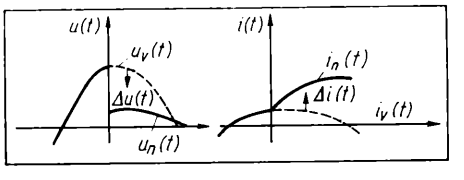
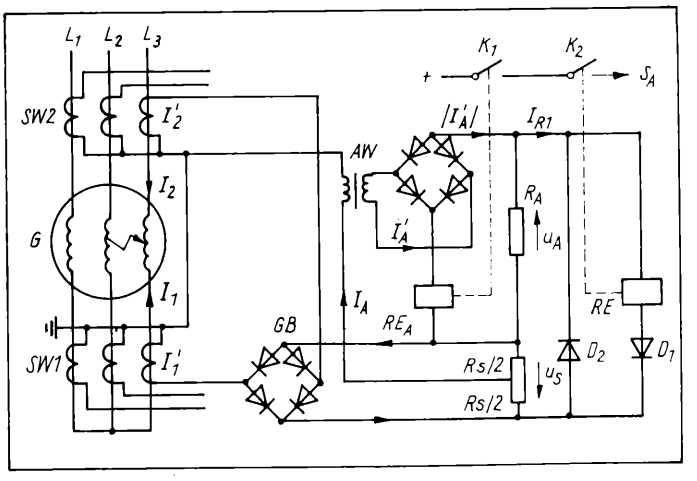


Bild 1
Strom- und Spannungsverläufe vor und nach Eintritt eines Kurzschlußfehlers

Bild 2. Generator-Differentialschutz zur ultraschnellen Erfassung von inneren Kurzschlüssen vor Eintritt der Sättigung (nach [11])



Prof. Dr.-Ing. habil. *Wilibald Winkler* ist Professor am Institut für Elektroenergie und Netzsteuerungen der Technischen Hochschule Gliwice, VR Polen.

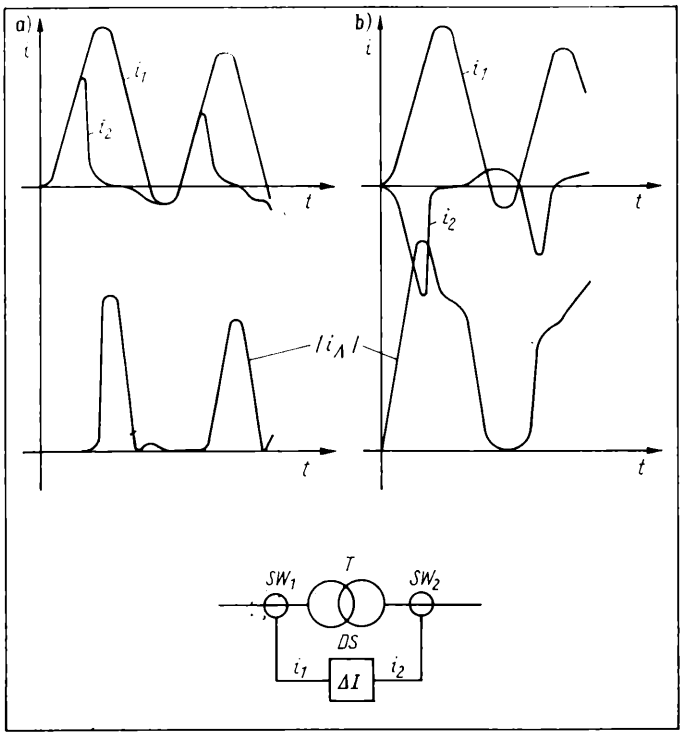


Bild 3. Stromverläufe in einem Transformator-Differentialschutz bei äußeren (a) und inneren (b) Kurzschlüssen mit Wandlersättigung

Kurzschlußfehlern auslösen darf, bei innenliegenden Kurzschlüssen dagegen unverzögert auslösen muß. Um das stabile Verhalten des Schutzes bei äußeren Fehlern zu gewährleisten, genügt meistens eine sorgfältige Wahl beider Stromwandlergruppen (inklusive Wandlerbürde) am Ein- und Ausgang des geschützten Betriebsmittels (bzw. am Anfang und Ende einer HS-Leitung), wodurch transiente Eisensättigungen in beiden Wandlergruppen zu völlig gleichen Verzerrungen der Sekundärstromverläufe führen müssen. Für gewisse Schutzobjekte ist es aber unmöglich, beide Wandlergruppen identisch auszulegen; ein klassisches Beispiel ist der Leistungstransformator, für den die Stromwandler auf der Unter- und Oberspannungsseite unterschiedliche Parameter haben. Daraus folgen auch unterschiedliche Verzerrungen der sekundären Stromverläufe in beiden Wandlergruppen. Der für die Gewährleistung der Selektivität ungünstigste Fall entsteht dann, wenn nur eine der Wandlergruppen in Sättigung gerät. Damit auch unter diesen Bedingungen der Differentialschutz stabil bleibt, wurde ein Zusatzkriterium zur Unterscheidung zwischen äußeren und inneren Kurzschlußfehlern angewendet [12]. Es beruht auf dem Zeitunterschied zwischen dem Auftreten des Differenzstroms und des Haltestroms: bei äußeren Fehlern und Wandlersättigung tritt der Differenzstrom erst nach einigen Millisekunden nach Fehlerbeginn auf, dagegen erscheint bei innenliegenden Fehlern der Differenzstrom gleichzeitig mit dem Kurzschlußstrom (Bild 3).

Bei innenliegenden Kurzschlüssen mit Wandlersättigung muß für den Transformator-Differentialschutz berücksichtigt werden, daß infolge dieser Sättigung im Differenzstrom ein hoher Anteil der zweiten Oberschwingung auftritt, die in diesem Schutz normalerweise für die Einschaltsperre ausgenutzt wird. Es besteht damit die Gefahr der vorübergehenden Sperrwirkung, wodurch die Fehlerabschaltung verzögert wird. Dieses Fehlverhalten kann durch die optimale Abstimmung des Filterkreises der Einschaltsperre bzw. noch effektiver durch die zeitweilige Aufhebung der beschriebenen Sperrwirkung bei stromstarken Kurzschlüssen (z. B. bei 10 I_n) abgestellt werden [12] [13].

Auch für andere Betriebsmittel sind gegenwärtig Differentialschutzeinrichtungen im Einsatz, die trotz transienter Stromwandlersättigung zu keinen Fehlfunktionen führen [14].

1.2.2. Phasenvergleichsschutz

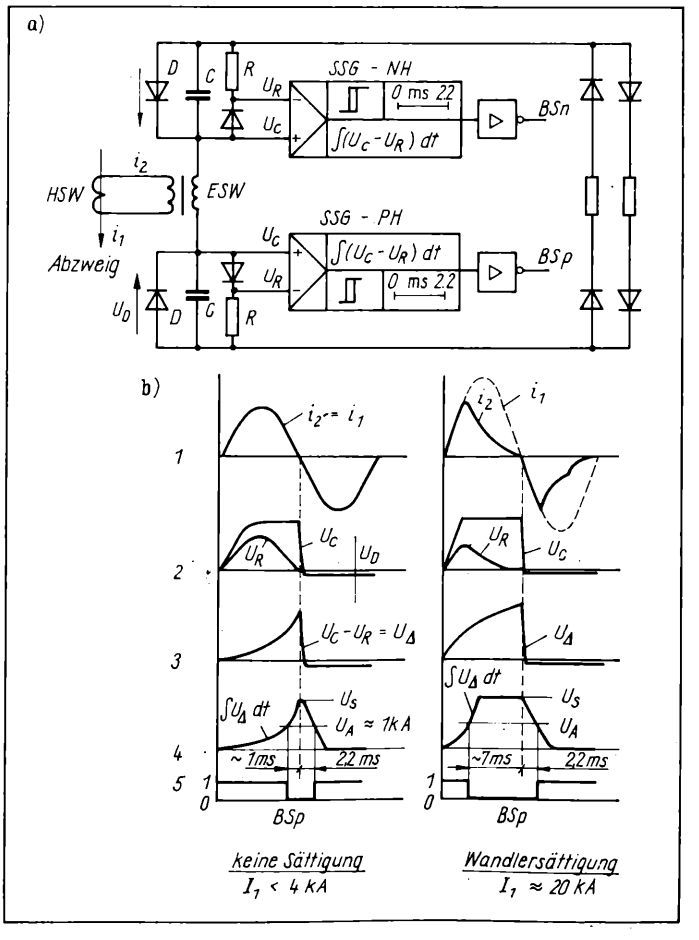
Der Phasenvergleichsschutz (PVS) wird in einigen Ländern gemeinsam mit dem Distanzschutz zur Erfassung von Kurzschlüssen auf Hoch- und Höchstspannungsleitungen eingesetzt. Seine Empfindlichkeit bei Wandlersättigungen hängt im wesentlichen davon ab, ob die PVS-Einrichtung nur eine oder beide Halbschwingungen je Periode überwacht. Für beide Ausführungsvarianten kann durch die sorgfältige Wahl der Stromwandler (inklusive Bürde) an beiden Leitungsenden eine Fehlfunktion vermieden werden. Bei inneren Kurzschlußfehlern ist die Variante mit Überwachung der positiven und negativen Halbschwingung in Hinsicht auf die Unempfindlichkeit gegenüber durch Sättigung verzerrten Stromsignalen viel günstiger, da durch die entsprechende logische Verknüpfung der Meßsignale in der Schutzeinrichtung die korrekte Fehlererfassung sichergestellt werden kann.

1.2.3. Distanzschutz

Die Anfälligkeit des Distanzschutzes auf transiente Stromwandlersättigungen ist im wesentlichen durch das angewandte Prinzip der Distanzmessung bedingt. Abhängig von der Ausführungsvariante (d.h. Amplituden- oder Phasenvergleich, Form der Auslösekennlinie usw.) sind grundsätzlich zwei verschiedene Auswirkungen der Wandlersättigung auf die Reichweite des Schutzes möglich: entweder wird sie verkürzt oder auch erweitert. Im ersten Fall führt das zur Abschaltung des Kurzschlußfehlers mit einer Zeitverzögerung, die der nächsten Schutzstufe entspricht, im zweiten dagegen wird die Fehlerabschaltung beschleunigt, was z. B. die unselektive Erfassung von in der zweiten Distanzstufe liegenden Kurzschlußfehlern in der Grundzeit verursacht.

Es gibt verschiedene Verfahren, die das richtige Verhalten der Distanzschutzeinrichtungen bei Sättigungserscheinungen sicherstellen; an dieser Stelle seien nur zwei davon erwähnt. Das erste beruht auf der sog. Mehrfachmessung (auch als Meßwiederholung bekannt), wonach der Schutz zwei aufeinanderfolgende Halbschwingungen der Meßgrößen auswertet, bevor er eine Entscheidung trifft, d.h., das Meßglied gibt ein Auslösesignal nur dann ab, wenn die erwähnten zwei Messungen auf einen Fehler in der ersten Distanzstufe hinweisen. Es genügt, wenn die Meßwiederholung nur für Kurzschlüsse an der Stufengrenze erfolgt, wodurch man eine Distanz/Zeit-Kennlinie mit gleitendem Kippunkt erhält [15]. Dieses Verfahren führt zu einer geringen Auslöseverzögerung bei Fehlern am Ende der Stufengrenze.

Bild 4. Prinzip (a) und Signalverläufe (b) in einem Sammelschienenschutz bei einem äußeren Kurzschluß mit Wandlersättigung im fehlerbehafteten Abzweig (nach [18])
SSG-PH Sperrsignalgeber für positive Halbschwingungen
SSG-NH Sperrsignalgeber für negative Halbschwingungen



Das zweite Verfahren beruht auf der Anwendung eines Sättigungszusatzes, in dem bei Wandlersättigung dem Meßsystem ein extrapolierter, sinusförmiger Strom zugeschaltet wird [16].

1.2.4. Sammelschienenschutz

Die Gefahr der transienten Wandlersättigung ist besonders bei Kurzschlüssen in der Nähe von Hoch- und Höchstspannungs-Schaltanlagen groß. Wegen des hohen Gesamtkurzschlußstromes und der großen Zeitkonstanten des Gleichstromgliedes ist die Sättigung der Stromwandler im fehlerbehafteten Abzweig unvermeidbar. Für den Sammelschienenschutz, der für solche Anlagen als Grundschutz zur Erfassung von Kurzschlüssen eingesetzt wird, bedeutet das die Möglichkeit einer Fehlauslösung bei äußeren Fehlern und damit die schwerwiegende unnötige Heraustrennung des Sammelschienensystems aus dem Verbundnetz. Als Gegenmaßnahme wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die eine sichere Sperrung des Schutzes auch bei enormen Verzerrungen der Stromverläufe gewährleisten. Zu diesen Verfahren gehört auch die oben beschriebene Mehrfachmessung in zwei aufeinanderfolgenden Halbschwingungen: in der ersten Halbschwingung tendiert der Schutz zur Auslösung (hoher Differenzstrom, Bild 3a), in der zweiten zur Sperrung. Es genügt demnach zur Sicherstellung der transienten Stabilität des Schutzes die gemeinsame Auswertung der Meßergebnisse in der ersten und zweiten Halbschwingung in einer UND-Schaltung: solange beide Halbwellen nicht eindeutig zur Auslösung neigen, solange wird auch kein Abschaltbefehl durch den Schutz abgegeben [17].
Eine andere Lösung basiert auf der Ausnutzung von Sättigungssperrsignalen, die derartig mit der Differenzstrommessung verknüpft werden, daß bei äußeren Kurzschlußfehlern mit Wandlersättigung eine Auslösung verhindert wird [18]. Die Bildung des Sättigungssperrsignals zeigt für einen Abzweig Bild 4a), die Signalverläufe für die positiven Halbschwingungen bei äußeren Kurzschlüssen ohne und mit Wandlersättigungen Bild 4b). Ähnliche Verläufe erhält man für die negativen Halbschwingungen. Es ist ersichtlich, daß der Sekundärstrom i_2 vom Hauptstromwandler HSW über den Eingangswandler ESW getrieben wird. Formgetreu zu diesem Strom ist die Spannung U_R, dagegen steigt die Spannung U_C am Kondensator C bei Stromanstieg auch an. Im Nulldurchgang von i_2 wird durch Entladung des Kondensators $U_C = U_D$, wobei U_D die Durchlaßspannung der Diode D ist. Aus beiden Spannungen U_C und U_R wird im Sättigungssignalgeber SSG eine Differenzspannung U_Δ gebildet (Verlauf (3)), die anschließend integriert wird (Verlauf (4)). Infolge der Wandlersättigung wird so der Schwellwert U_A (proportional zum Primärstrom $I_1 \cong 1$ kA) für eine längere Zeit überschritten. Diese Tatsache wirkt sich auch auf das Sperrsignal *BSp* aus, das im weiteren (im Bild 4 nicht mehr gezeigt) als Teil des Schutzes in Verknüpfung mit dem Differenzstrom zum Sperren des Auslösesignals ausgenutzt wird.

2. Schlußfolgerungen

Seitdem der Einfluß von Stromwandlersättigungen auf die Funktionsweise von Schutzeinrichtungen erkannt wurde, sind mannigfaltige Verfahren entwickelt worden, die das korrekte Verhalten dieser Schutzeinrichtungen auch bei extrem verzerrten Stromsignalen gewährleisten. Dadurch kann in vielen Fällen auf den Einsatz von speziellen Stromwandlern der Klasse TPY bzw. TPZ verzichtet werden.

Literatur

[1] *Chamia, M.:* Transient behaviour of associated instrument transformers and high-speed distance and directional comparison protection. CIGRE Colloquium Melbourne 1979
[2] *Wiszniewski, A.:* Przekladniki w elektroenergetyce. WNT Warszawa 1982
[3] *Freygang, H. J.:* Meßwandler für den Selektivschutz. ETG-Fachberichte No. 12. Berlin-Offenbach: VED-Verlag GmbH 1985, S. 156
[4] *Mouton, L.:* Nonconventional current and voltage transformers. Paris: CIGRE Report 1980
[5] *Kunckel, K.-H.:* Zur stationären und dynamischen Abbildungstreue von Stromwandlern – Möglichkeiten und Grenzen. Dissertation B, TU Dresden 1986
[6] *Brendler, W.; Koettnitz, H.:* Meßmittel und Meßmethoden in der energetischen Elektrotechnik unter dem Einfluß der Halbleiter- und Mikroelektronik. ELEKTRIE, Berlin (1984) 4, S. 144
[7] *Brendler, W.:* Prinzip, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten des Brückenwandlers. 9. Wiss. Konferenz der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden 1981

Fortsetzung auf Seite 218

Bestimmung des Gesamtfehlers von Stromwandlern im Überstromgebiet mit der Spannungsabbildungsmethode

W. Jalmuzny, Lodz; VR Polen

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* zum 65. Geburtstag

Die Prüfung von Stromwandlern im Überstromgebiet schafft viele Probleme und Schwierigkeiten. Man muß über Hochstromtransformatoren mit entsprechend großer Leistung verfügen, und es ist zu beachten, die zu prüfenden Stromwandler infolge der Wärmeverluste nicht zu beschädigen. Unter Berücksichtigung der genannten Bedingungen erfolgt die Bestimmung der metrologischen Eigenschaften von Stromwandlern durch die Messung des Gesamtfehlers. Polnische Normalisierungsvorschriften [13] geben zwei Prüfmethoden für diesen Fehler an. Die erste – die direkte Methode – beruht auf der Verwendung einer Differentialschaltung mit zwei Normalstromwandlern. Dieses Meßverfahren ist zur Genauigkeitsprüfung der Stromwandler, unabhängig von ihrer Konstruktionsart und ihren Einsatzbedingungen – z. B. der Lage und Form der primären Strombahn – geeignet. Die erzielten Meßergebnisse können als Normalergebnisse bezüglich der Genauigkeitsbestimmung mit indirekten Methoden angesehen werden. Es ist jedoch erforderlich, spezielle Einrichtungen zur Messung des Gesamtfehlers zu verwenden. Das können sowohl Quotientenmeßgeräte [2] als auch elektronische Meßeinrichtungen [4] sein.
Die zweite, in der polnischen Norm [13] zugelassene Methode zur Bestimmung des Gesamtfehlers beruht auf der Messung des Leerlaufstroms. Die Sekundärwicklung wird an die Sinusspannungsquelle angeschlossen, die Primärwicklung ist geöffnet. Diese Methode darf jedoch nur für Stromwandler mit folgenden Konstruktionseigenschaften verwendet werden:

- Ringkernwandler
- Sekundärwicklung gleichmäßig längs des Kernumfangs verteilt
- Primärwicklung gleichmäßig längs des Kernumfangs verteilt oder genau zentrierter Einleiterwandler.

In anderen Fällen ist sie dann verwendbar, wenn ein Korrekturfaktor aus den Ergebnissen mit der direkten Methode für dieselbe Bauart bestimmt wurde.
Dieses indirekte Verfahren folgt aus der Spannungsabbildungsmethode, deren Prinzip in [10] beschrieben ist. Es existieren Untersuchungen, um die Analyse des Leerlaufstroms der Stromwandler sowohl im Übergangszustand [6] als auch im stationären Zustand [3] [7] durchzuführen.
Bei der Spannungsabbildung von Strömen des Stromwandlers im Überstromgebiet treten Probleme auf, die mit der Veränderlichkeit der Streureaktanz der Sekundärwicklung [7] und der sog. doppelten magnetischen Streuung [1] verbunden sind. Das ist besonders wichtig für bestimmte Konstruktionsarten der Stromwandler [7].
Ziel der Arbeit ist eine Analyse der theoretischen Voraussetzungen der Spannungsabbildungsmethode und den daraus folgenden Verwendungsmöglichkeiten für die Bestimmung des Gesamtfehlers im Überstromgebiet von Stromwandlern beliebiger Bauart.

1. Streureaktanz der Sekundärwicklung von Stromwandlern im Überstromgebiet

Die Untersuchung der magnetischen Streuung der Stromwandler ist durch die Aufspaltung des realen Induktionsflusses in den Hauptinduktionsfluß Φ_0 und den Primärstreufluß Φ_{1S} sowie Sekundärstreufluß Φ_{2S} möglich. Den angeführten Flüssen entsprechen in der Ersatzschaltung (Bild 1) die Induktivitäten L_μ'', L_1'' und L_2. Der Wirkleerlaufstrom wurde im Vergleich zum Blindleerlaufstrom vernachlässigt [5].

Dr.-Ing. *Wieslaw Jalmuzny* ist wissenschaftlicher Assistent in der Abteilung Meßwandler des Instituts für Grundlagen der Elektrotechnik an der Technischen Universität Lodz, VR Polen.

Die Kenntnis der Sekundärkreisparameter, besonders der Induktivität L_2, ist Voraussetzung für die richtige Beurteilung der metrologischen Eigenschaften der Stromwandler bei Überströmen. L_2 hängt u.a. von der Wicklungsverlegung und der Form der primären Strombahn bei Stabstromwandlern [7] ab. Dabei hat die magnetische Kopplung der Wicklungen unter Beachtung ihrer Streuflüsse Φ_{1S} und Φ_{2S} einen bedeutenden Einfluß auf die Parameter R und L des Sekundärkreises. Diese Erscheinung beruht darauf, daß der Streufluß einer Wicklung den von der zweiten Wicklung besetzten Raum durchdringt. Die Verkettung wird als doppelte magnetische Streuung bezeichnet [1] und durch die Gegeninduktivität M_S ausgedrückt. Folglich gilt für die Schaltung gemäß Bild 1:

$$u_{20} = (R_2 + R_B)\, i_2 + (L_2 + L_B)\frac{\mathrm{d}\, i_2}{\mathrm{d}t} - M_S \frac{\mathrm{d}\, i_1''}{\mathrm{d}t}. \tag{1}$$

Im Überstromgebiet ist — wegen der Magnetkreissättigung — der zeitliche Verlauf des Stroms i_0'' nicht sinusförmig. Deswegen sind folgende Beziehungen zu beachten:

$$\begin{aligned} i_1'' &= I_{1\,m}'' \sin(\omega t - \delta) \\ i_2 &= I_{2\,m} \sin(\omega t) + i_{2H} \end{aligned} \tag{2}$$

δ Winkelfehler des Stromwandlers,
i_{2H} Gesamtsumme der Oberwellen des Sekundärstromes.

Einsetzen von (2) in (1) führt zu

$$\begin{aligned} u_{20} = {} & (R_2 + R_B)\, i_{2H} + (L_2 + L_B)\frac{\mathrm{d}\, i_{2H}}{\mathrm{d}t} \\ & + \left(R_2 + R_B - \omega M_S \frac{I_{1\,m}''}{I_{2\,m}} \sin\delta\right) I_{2\,m} \sin\omega t \\ & + \omega\left(L_2 + L_B - M_S \frac{I_{1\,m}''}{I_{2\,m}} \cos\delta\right) I_{2\,m} \cos\omega t. \end{aligned} \tag{3}$$

Daraus ergeben sich folgende Schlußfolgerungen:

1. Die doppelte magnetische Streuung wirkt nicht auf die Oberwellen des Sekundärstroms, d.h. der Gebrauch der Begriffe Gesamtresistanz und Gesamtinduktivität der Sekundärseite ist im Überstromgebiet des Stromwandlers unzulässig.
2. Gesamtresistanz und Gesamtinduktivität können nur für die erste Harmonische bestimmt werden:

$$R_{2G} = R_2 - \omega M_S \frac{I_{1\,m}''}{I_{2\,m}} \sin\delta, \tag{4}$$

$$L_{2G} = L_2 - M_S \frac{I_{1\,m}''}{I_{2\,m}} \cos\delta. \tag{5}$$

Gemäß (4) und (5) sind für R_{2G} und L_{2G} zwei Bestandteile zu unterscheiden: R_2 und L_2 entsprechen dem Fall, wenn $I_{1\,m}'' = 0$ gilt; d.h. Leerlauf mit geöffnetem Primärkreis. Der zweite Anteil ist mit der Gegeninduktivität M_S verknüpft und variiert je nach dem Verhältnis $\frac{I_{1\,m}''}{I_{2\,m}}$ und der Größe des Winkelfehlers.

2. Theoretische Grundlagen der Spannungsabbildungsmethode

Das Abbildungsverfahren folgt aus den Gleichungen, die der im Bild 1 gezeigten Ersatzschaltung entsprechen:

$$i_1'' = i_2 + i_0''; \quad i_1'' = I_1''\ \sqrt{2}\sin\omega t. \tag{6}$$

Aus (1) und (6) ergibt sich:

$$u_A(t) = \sqrt{(R_2 + R_B)^2 + \omega^2 (L_2 + L_B - M_S)^2}\, I_1''\ \sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi_{i1}) \tag{7}$$

mit

$$\varphi_{i1} = \arctan\frac{\omega (L_2 + L_B - M_S)}{R_2 + R_B}. \tag{8}$$

(7) stellt die Abbildungsbedingung dar. Um einen, dem sinusförmigen Primärstrom i_1'' entsprechenden Leerlaufstrom i_0'' zu erhalten, muß

1. im Leerlauf des Stromwandlers gemäß Bild 2 R_B und L_B vorgeschaltet und
2. eine sinusförmige Spannung mit dem Effektivwert

$$U_A = \sqrt{(R_2 + R_B)^2 + \omega^2 (L_2 + L_B - M_S)^2}\, I_1'' \tag{9}$$

eingespeist werden.

Bild 1
Ersatzschaltung des Stromwandlers im Überstromgebiet unter Berücksichtigung der doppelten magnetischen Streuung

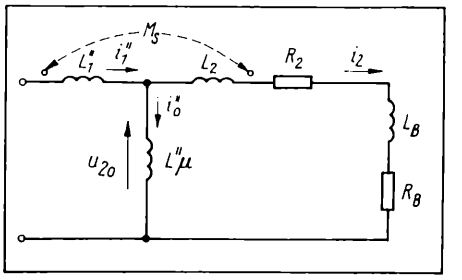


Bild 2
Schaltung der Spannungsabbildungsmethode

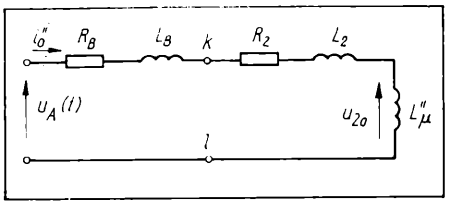
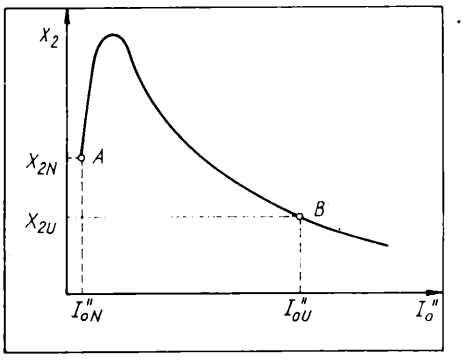


Bild 3
Reaktanz X_2 in Abhängigkeit von I_0''
A Nennstrombereich;
B Überstromgebiet



Zur Bestimmung des Gesamtfehlers wird der Effektivwert des Stroms I_0'' gemessen und der Gesamtfehler berechnet:

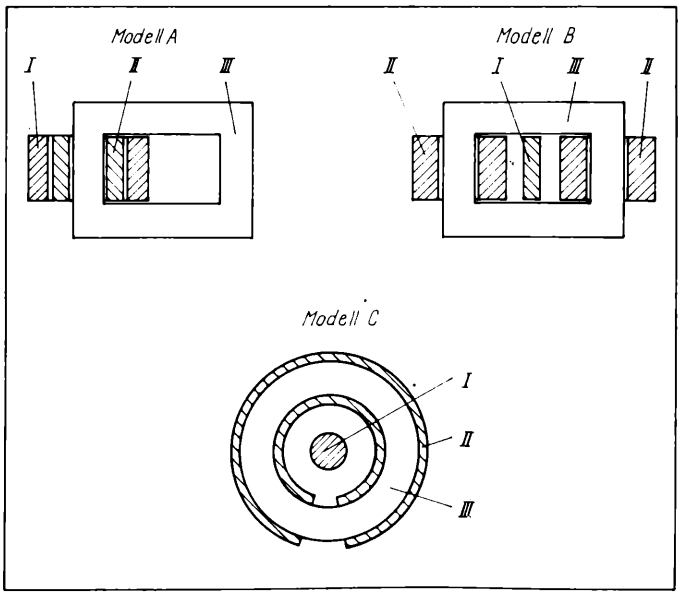
$$\Delta I_G = \frac{I_0''}{I_1''} 100\,\%. \tag{10}$$

Ein bedeutender Unterschied zwischen der Abbildungsmethode nach [7] und der vorstehenden besteht in der Berechnung des Effektivwertes U_A. Er darf nicht für die Reaktanz $X_{2G} = L_{2G}$ [siehe (5)], sondern für die Ersatzreaktanz

$$X_{2A} = \omega (L_2 - M_S) \tag{11}$$

bestimmt werden. Die physikalische Interpretation von (11) ergibt sich daraus, daß der Einfluß der Doppelstreuung ausschließlich auf die erste Harmonische des Sekundärstromes wirkt.

Bild 4. Konstruktionsformen der geprüften Stromwandlermodelle
I Primärwicklung; II Sekundärwicklung; III Kern



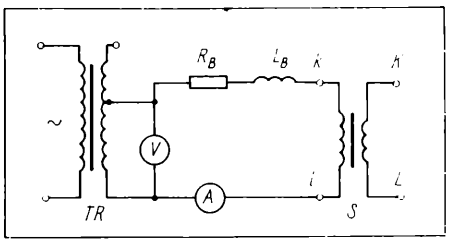


Bild 5
Meßschaltung zur Spannungsabbildungsmethode
TR Stelltransformator; S Prüfling

3. Bestimmung der Ersatzreaktanz X_{2A}

Aus (11) folgt: Zur Bestimmung der Reaktanz X_{2A} ist es notwendig, die Streureaktanz $X_2 = \omega L_2$ und die Reaktanz $X_M = \omega M_S$ zu kennen.

Die Streureaktanz X_2 ist im Leerlauf des Wandlers bestimmbar. Es wurde zur Messung des X_2-Wertes ein Meßverfahren verwendet, dessen Genauigkeit höher als 5% ist [3]. Die Charakteristik $X_2 = f(I_0'')$ wird qualitativ im Bild 3 dargestellt. Der Punkt A entspricht dem Nennbereich, d.h.

$$I_{0N}'' \cong \frac{\Delta}{100\%} I_{2N}, \tag{12}$$

Δ Klasse des Stromwandlers, I_{sN} sekundärer Nennstrom.

Der Punkt B kennzeichnet den X_{2U}- und den I_{0U}''-Wert bei Überstrom für den angegebenen Gesamtfehler ΔI_G, d.h.

$$I_{0U}'' = \frac{\Delta I_G}{100\%} I_{2N}. \tag{13}$$

Im Nennbetrieb des Stromwandlers $\left(\delta \approx 0; \frac{I_{1m}''}{I_{2m}} \approx 1\right)$ erhält man aus (5):

$$X_M = \omega M_S = X_{2N} - X_{2GN} \tag{14}$$

mit

$$X_{2N} = \omega L_{2N}; \; X_{2GN} = \omega L_{2GN}.$$

Die Bestimmung von X_{2GN} im Nennstromgebiet kann z.B. nach der Fehlerkurvenmethode [9] erfolgen. Den X_{2N}-Wert erhält man aus der im Bild 3 dargestellten Kennlinie (Punkt A). Der X_M-Wert kann als konstant für eine bestimmte Wicklungsanordnung betrachtet werden, denn er folgt aus der magnetischen Kopplung der Wicklungen im nichtferromagnetischen Raum.

Die Ersatzreaktanz X_{2A} ist nach (11) zu berechnen, wenn die Leerlaufreaktanz $X_{2U} = \omega L_{2U}$ im Punkt B (Bild 3) bekannt ist. Die genaue Bestimmung von X_{2U} ist jedoch wegen der Nichtlinearität der Kennlinie $X_2 = f(I_0'')$ unmöglich, weil der Leerlaufstrom I_{0U}'' für den entsprechenden Überstrom I_1'' nicht genau zu ermitteln ist. Die Änderung von X_2 gemäß Bild 3 ist jedoch im Bereich großer Ströme I_0'' ziemlich klein. Deswegen wurde für diese Betrachtung die Reaktanz X_{2U} für $I_{0U}'' = I_{2N}$ in Rechnung gestellt.

Unter Berücksichtigung von (14) kann X_{2A} folgendermaßen berechnet werden:

$$X_{2A} = X_{2U} - X_M = X_{2U} - X_{2N} + X_{2GN}. \tag{15}$$

X_{2U} nach Kennlinie Bild 3 (Punkt B), X_{2N} nach Kennlinie Bild 3 (Punkt A) und X_{2GN} aus der Fehlerkurve im Nenngebiet ermittelt.

4. Meßergebnisse

Zwecks experimenteller Überprüfung der Richtigkeit der dargestellten Spannungsabbildungsmethode zur Gesamtfehlerbestimmung wurden drei Stromwandlermodelle (Bild 4) mit verschiedenen Doppelstreufaktoren geprüft:

Modell A
Stromwandler mit Rechteckkern und konzentrischen Zylinderwicklungen (größter M_S-Wert).

Modell B
Stromwandler mit Rechteckkern, Primärstab mit rechteckigem Querschnitt symmetrisch im Fenster, Sekundärwicklung auf zwei Schenkel verteilt (mittlerer M_S-Wert).

Modell C
Stromwandler mit Ringkern, Primärstab mit kreisförmigem Querschnitt zentrisch im Fenster, Sekundärwicklung gleichmäßig auf dem Kernumfang verteilt (kleinster M_S-Wert).

Die Bestimmung der Ersatzreaktanz X_{2A} (Abschn. 3.) für die einzelnen Modelle führt zu folgenden Ergebnissen:

Modell A $\quad X_{2A} = 0,$
Modelle B und C $\quad X_{2A} = X_{2GN}.$

Besonders interessant ist das Resultat für Modell A.

Stromwandler dieser Bauart gehören nach [11] und [12] zur sogenannten Hochreaktanzgruppe (high-reactance). Man könnte in diesem Fall vermuten, daß ihre Eigenschaften im Überstromgebiet wegen der großen Streureaktanz nicht abgebildet werden können. Die Verwendbarkeit der Spannungsabbildungsmethode ist jedoch gegeben, wenn die angelegte Spannung U_A unter Berücksichtigung der Gegeninduktivität M_S ausgerechnet wurde.

Die Meßschaltung zur Überprüfung der beschriebenen Methode ist im Bild 5 dargestellt. Der Stelltransformator TR soll eine entsprechend große Leistung haben, um sinusförmige Spannung zu garantieren. Die Resistanz R_B und die Reaktanz $X_B = \omega L_B$ entsprechen der Bürde des Stromwandlers. Der Meßverlauf ist wie folgt:

1. Bestimmung der Werte R_2, R_B, X_{2A}, X_B,
2. Festlegung der Effektivwerte des Stroms $I_{1i}'' = I_{1i}\frac{w_1}{w_2}$, $i = 1, \; 2 \cdots n$,
3. Berechnung der Spannung U_{Ai},
4. Einspeisung der Spannung U_{Ai} in die Meßschaltung (Bild 5),
5. Messung des Effektivwertes des Stroms I_{0i}'', $i = 1, \; 2 \cdots n$,
6. Berechnung des Gesamtfehlers ΔI_{Gi}, $i = 1, \; 2 \cdots n$, nach (10)

Endergebnis ist die Kennlinie $\Delta I_G = f(I_1'')$.

Die Bestimmung des Nenngrenzstromes (Stromwandler für Meßzwecke) oder des Fehlergrenzstromes (Stromwandler für Schutzzwecke) ist nach dieser Kennlinie beim entsprechenden ΔI_G-Wert (5% oder 10%) möglich.

Mit der direkten Methode wurden die Meßergebnisse verifiziert. In der verwendeten Differentialschaltung ist ein elektronisches Meßgerät zur schnellen Messung des Gesamtfehlers [4] [8] verwendet worden.

Die Versuche erstreckten sich über einem ziemlich großen Bereich bzgl. der Belastung und der Überströme. Die Kennlinie $\Delta I_G = f(I_1'')$ wurde für die Gesamtfehlerwerte von 5% bis 25% (Modell A) bzw. bis 50% (Modelle B und C) bestimmt. Im Vergleich zur direkten Methode waren die Abweichungen kleiner als 7% für Modell A und 5% für die Modelle B und C.

5. Zusammenfassung

Die Richtigkeit der Spannungsabbildungsmethode zur mittelbaren Messung des Gesamtfehlers von Stromwandlern für Meß- und Schutzzwecke ist unter Voraussetzung der korrekten Bestimmung der sogenannten Ersatzreaktanz X_{2A} für jede Bauart befriedigend. Die Ersatzreaktanz X_{2A} für Wickelstromwandler (Modell A) ist Null; für Stabstromwandler (Modelle B und C) ist sie gleich der Streureaktanz der Sekundärwicklung im Nenngebiet.

Es ist möglich, die angeführte Methode für Stabstromwandler mit primären Strombahnen verschiedener Art und unter Berücksichtigung des Einflusses der Rückleitung zu verwenden. Dazu ist es jedoch notwendig, die Ersatzreaktanz X_{2A} für verschiedene Strombahnanordnungen zu bestimmen.

Literatur

[1] *Baczurin, N.:* Stromwandler (russisch). Moskau: Verlag Energie 1964
[2] *Brendler, W.:* Der „effektive Fehler", ein Kriterium zum Beurteilen der Genauigkeit der Meßwertübertragung von Stromwandlern im Überstromgebiet. ELEKTRIE, Berlin (1968) 2, S. 67 – 70
[3] *Jalmuzny, W.:* Messung des Gesamtfehlers von Stromwandlern im Überstromgebiet. Dissertation. Technische Universität Lodz 1980
[4] *Jalmuzny, W.; Kawczynski, R.:* Meßeinrichtung zur schnellen Messung des Gesamtfehlers von Stromwandlern (polnisch). PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY (1987) 4, S. 92 – 94
[5] *Koszmider, A. L.; Olak, J.; Piotrowski, Z.:* Stromwandler (polnisch). Warschau: Wissenschaftlich-Technischer Verlag 1985
[6] *Kurek, J.; Zagan, Z.; Zydanowicz, J.:* Untersuchung von Stromwandlern mittels Spannungsabbildung der Ströme (polnisch). Wiss. Hefte der TU Warschau, ELEKTRYKA (1973) 34, S. 5 – 19
[7] *Nowicz, R.:* Elektromagnetische Prozesse in Stromwandlern im Überstromgebiet (polnisch). Wiss. Hefte der TU Lodz, ROZPRAWY NAUKOWE (1980) 25
[8] *Piotrowski, Z.; Jalmuzny, W.; Kawczynski, R.:* Einige Grundprobleme der Messung des Gesamtfehlers von Stromwandlern im Überstromgebiet unter Anwendung des Differentialverfahrens (polnisch). ROZPRAWY ELEKTROTECHNICZNE (1985) 3 – 4, S. 731 – 746
[9] *Starczakow, W.:* Eine einfache Methode zur Bestimmung der Streureaktanz der Sekundärwicklung vom Stromwandler (polnisch). Wiss. Hefte der TU Lodz, ELEKTRYKA (1977) 59
[10] *Wolpert, T.:* Untersuchung von Schutzschaltungen mittels Spannungsabbildungsmethode (polnisch). PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY (1958) 5/6
[11] BS 3938 Current transformers 1973
[12] IEC-Publikation 185 Current transformers 1966
[13] PN-84/E-06552 Stromwandler (polnisch)

EA 6015

Verlustberechnung in ferromagnetischen Kesselabschirmungen und in den damit geschirmten Kesselteilen von Transformatoren

D. Roseburg, KDT, Dresden

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* zum 65. Geburtstag

In [1] wurden die vom Streufeld verursachten Verluste im ungeschirmten Transformatorkessel berechnet und in [2] eine Möglichkeit zur Ermittlung des Streuflusses in magnetischer Kesselabschirmung und geschirmter Kesselwand angegeben. Ausgangspunkt waren in beiden Fällen die mit Hilfe der Spiegelungsmethode ermittelten magnetischen Feldkomponenten an den Bauteiloberflächen.
Mit der Computertechnik haben sich heute die gegenüber der Spiegelungsmethode genaueren numerischen Verfahren zur Magnetfeldberechnung [4] durchgesetzt, die trotz erhöhten Rechenaufwandes zunehmend auch mit Kleinrechnern beherrschbar sind [5].
Anknüpfend an [5] werden nachfolgend die auf einer numerischen Magnetfeldberechnung (2D) basierenden Ergebnisse der Verlustberechnung in magnetischen Shunts und den damit geschirmten Kesselteilen eines Transformators vorgestellt und mit Meßwerten verglichen.

1. Verlustberechnung in ferromagnetischen Kesselabschirmungen

Die in Transformatorkesseln zur Verringerung der Zusatzverluste [3] verwendeten ferromagnetischen Abschirmungen bestehen aus senkrecht zur Kesselfläche angeordneten Texturblechstreifen (Stabshunts) oder aus parallel zum Kessel verlaufenden Blechtafeln (Plattenshunts). Die Dicke der Shunts wird in Abhängigkeit von der Transformatornennleistung so gewählt, daß bei maximaler Streuflußbelastung im Shunt keine Sättigung auftritt (Bild 1).
Im Unterschied zum Kern eines Transformators mit annähernd konstanter Joch- und Schenkelinduktion ändert sich im Shunt die Induktion sowohl über die Shunthöhe als auch proportional der Belastung. Zur Berechnung der Verluste ist deshalb eine Unterteilung des Shunts in Abschnitte konstanter Induktion (Bild 2) erforderlich, wobei der jeweilige Induktionswert einem proportional der Belastung sich ändernden Mittelwert (räumlicher Mittelwert der Spitzenwerte) des Shuntabschnitts entspricht.
Ausgehend von der Normalkomponente der magnetischen Induktion B_n an der Shuntoberfläche folgen mit den Bezeichnungen im Bild 2:

— der je Shuntabschnitt eintretende/austretende magnetische Fluß

$$\Delta\Phi_{\mathrm{Sh}\nu} = \Delta\Phi_{1\nu} + \Delta\Phi_{2\nu} \tag{1}$$

mit

$$\left.\begin{aligned}\Delta\Phi_{1\nu} &= B_{\mathrm{n}1\nu}\,\Delta h_{\mathrm{Sh}\nu}\,l_{\mathrm{Sh}}\\ \Delta\Phi_{2\nu} &= B_{\mathrm{n}2\nu}\,\Delta h_{\mathrm{Sh}\nu}\,l_{\mathrm{Sh}}\end{aligned}\right\}\begin{aligned}&>0 \text{ eintretend}\\ &<0 \text{ austretend}\end{aligned}$$

— der maximale bzw. minimale magnetische Fluß eines Shuntabschnitts

$$\Phi_{\mathrm{Sh}\nu} = \Phi_{\mathrm{Sh}\nu-1} + \Delta\Phi_{\mathrm{Sh}\nu} \quad \text{für } \nu \geqq 2 \tag{2}$$

mit

$$\Phi_{\mathrm{Sh}1} = \Delta\Phi_{\mathrm{Sh}1}$$

— der mittlere magnetische Fluß eines Shuntabschnitts

$$\overline{\Phi}_{\mathrm{Sh}\nu} = (\Phi_{\mathrm{Sh}\nu-1} + \Phi_{\mathrm{Sh}\nu})/2 \quad \text{für } \nu \geqq 2 \tag{3}$$

mit

$$\overline{\Phi}_{\mathrm{Sh}1} = \Phi_{\mathrm{Sh}1}/2\,.$$

Dr. sc. techn. *Detlev Roseburg* ist Hochschuldozent an der Technischen Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik.

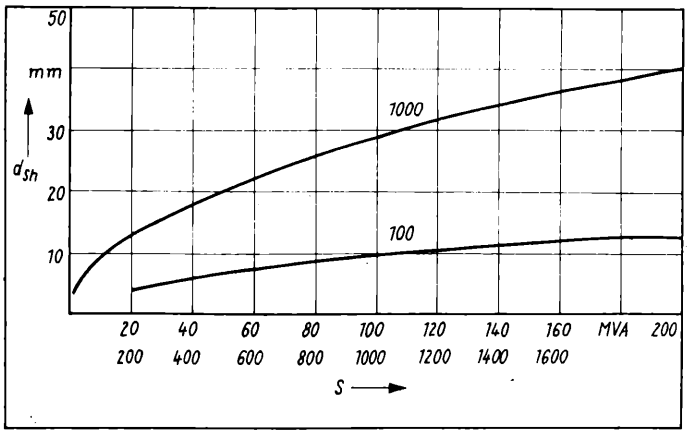


Bild 1. Shuntdicke von Drehstromtransformatoren nach [3]

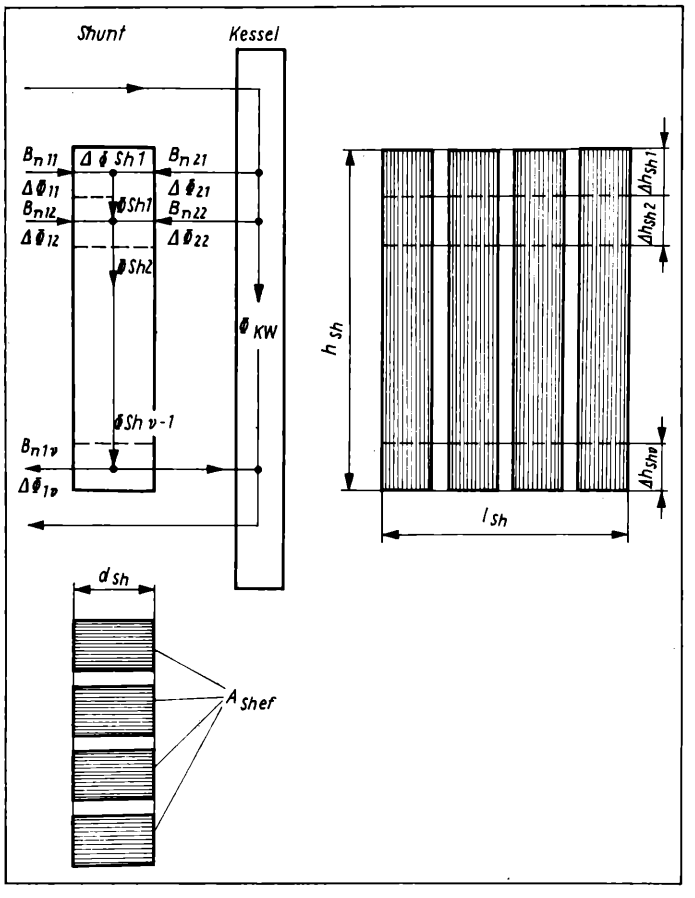


Bild 2. Magnetflußaufteilung auf Shunt und Kessel

Für die mittlere magnetische Induktion ergibt sich

$$\overline{B}_{\mathrm{Sh}\nu} = \overline{\Phi}_{\mathrm{Sh}\nu}/A_{\mathrm{Sh\,ef}} = \overline{\Phi}_{\mathrm{Sh}\nu}/(l_{\mathrm{Sh\,ef}}\,d_{\mathrm{Sh}})\,, \tag{4}$$

und mit den spezifischen Ummagnetisierungsverlusten des Shuntmaterials sind die Verluste eines Abschnitts

$$\Delta P_{\mathrm{Sh}\nu} = p_{\mathrm{Sh}}\,(f_{\mathrm{Sh}}/f)^2\,(B_{\mathrm{Sh}\nu}/B)^2\,\Delta m_{\mathrm{Sh}\nu}\,. \tag{5}$$

Für den gesamten Shunt gilt

$$P_{\mathrm{Sh}} = \Sigma\,\Delta P_{\mathrm{Sh}\nu}\,. \tag{6}$$

2. Verlustberechnung in ferromagnetisch geschirmten Kesselteilen

Die Verluste P_{K} in den ferromagnetisch geschirmten Kesselteilen ergeben sich auf Grund magnetischer Flußanteile, die in ungeschirmten Kesselbereichen eintreten und erst im Wirkungsbereich der magnetischen Shunts aus dem Kessel abgesaugt werden. Ausgangspunkt der Verlustberechnung ist die Verteilung der Normalkomponente der magnetischen Induktion hinter den Shunts. Im Unterschied zu den Verlusten im Shunt handelt es sich beim Kessel nicht um die Verluste eines Blechpakets, sondern um die einer massiven ferromagnetischen Platte bei einseitigem Einfall einer elektromagnetischen Welle.

Der Wirbelstromanteil P_{Ft} dieser Verluste ist bei Annahme zeitlich sich ändernder Feldgrößen mit Hilfe des komplexen Poyntingschen Vektors berechenbar. Mit den Größen im Bild 3 gilt:

$$\vec{S} = (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{k}\, \underline{E}_y \underline{H}_x$$

$$= \vec{k} \sqrt{\frac{2\pi f \mu_{Fe}}{\varkappa_{Fe}}} H^2_{t\,max}\, e^{-2\sqrt{f \mu_{Fe} \pi \varkappa_{Fe}}\, z} e^{j\pi/4}, \quad (7)$$

$$P_{Ft} = \mathrm{Re}\{\oint \underline{\vec{S}}\, \mathrm{d}\vec{A}\}, \quad (8)$$

$$P_{Ft} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu_0 \pi f}{\varkappa_{Fe}}} \oint \sqrt{\mu_{rel}}\, H^2_{t\,max}\, \mathrm{d}A = K_{Ft} \oint \sqrt{\mu_{rel}}\, H^2_{t\,max}\, \mathrm{d}A. \quad (9)$$

Für den Hystereseanteil P_{Hy} der Verluste kann unter Berücksichtigung der Eindringtiefe

$$\delta = 1/\sqrt{\mu_0 \mu_{rel} \pi f \varkappa_{Fe}} \quad (10)$$

geschrieben werden:

$$P_{Hy} = K_{stat} \oint f \mu^2_{rel} H^2_{t\,max}\, \delta\, \mathrm{d}A = K_{Hy} \oint \mu_{rel} \sqrt{\mu_{rel}}\, H^2_{t\,max}\, \mathrm{d}A. \quad (11)$$

Beide Verlustanteile ergeben den Gesamtverlust

$$P_K = P_{Ft} + P_{Hy} = P_{Ft}\left(1 + \frac{K_{Hy}}{K_{Ft}} \mu_{rel}\right) \approx K\, P_{Ft}. \quad (12)$$

Für die abschnittsweise Verlustberechnung folgt

$$P_K \approx K\, K_{Ft} \Sigma \sqrt{\mu_{rel\,\nu}}\, H^2_{t\,max\,\nu}\, \Delta A_\nu. \quad (13)$$

Zur Ermittlung von $H_{t\,max}$ ist entweder eine quasistationäre Magnetfeldberechnung unter Berücksichtigung der Wirbelströme im Kessel oder die Kenntnis der materialspezifischen Abhängigkeit zwischen $H_{t\,max}$ und dem über die betrachtete Kesselläge l_K abschnittsweise eintretenden Fluß $\Delta \Phi_K / l_K$ erforderlich:

$$H_{t\,max} = f(\Delta \Phi_K / l_K) = f(B_{n2}\, \Delta h_K). \quad (14)$$

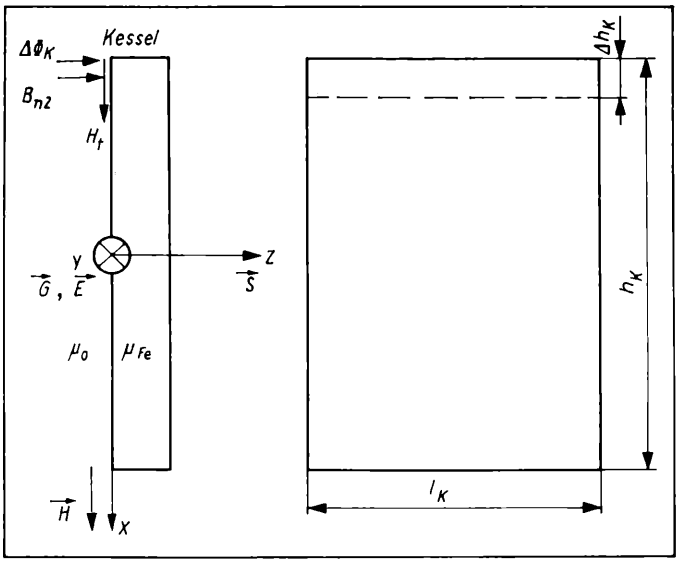


Bild 3. Koordinaten- und Größenfestlegungen zur Verlustberechnung im Kessel

3. Numerische Magnetfeldbestimmung

Die zur Verlustberechnung erforderliche Normalkomponente der magnetischen Induktion am Shunt bzw. an der Kesselwand wird mit Hilfe der Methode der finiten Differenzen bestimmt. Auf Grund der vergleichmäßigenden Wirkung des Shunts auf die Verteilung des magnetischen Feldes längs der Kesselwand kann die Berechnung zweidimensional erfolgen.

Bild 4 zeigt den vereinfachten Querschnitt des untersuchten Zweiwicklungstransformators mit der Anordnung des magnetischen Shunts an der Kesselwand. Bild 5 enthält die der Berechnung zugrunde gelegte Vernetzung mit 20×40 Gitterpunkten.

Bild 4. Vereinfachter Transformatorquerschnitt

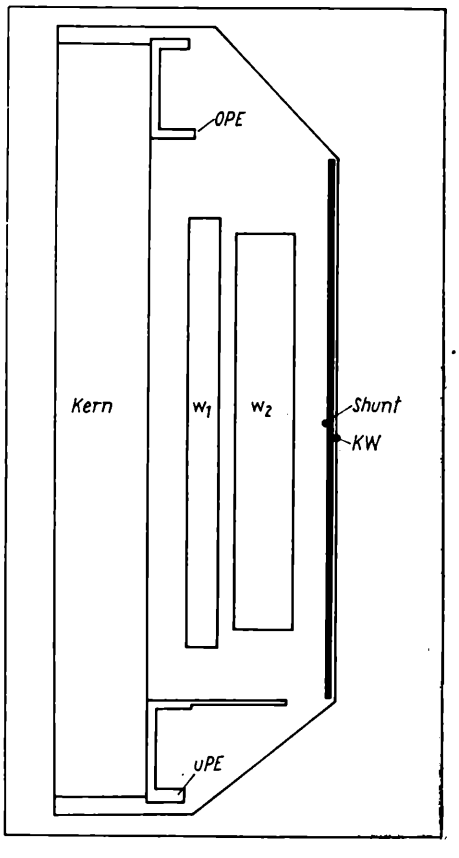


Bild 5. Vernetzung des Querschnitts gemäß Bild 4 (oberer Wickelraumausschnitt)

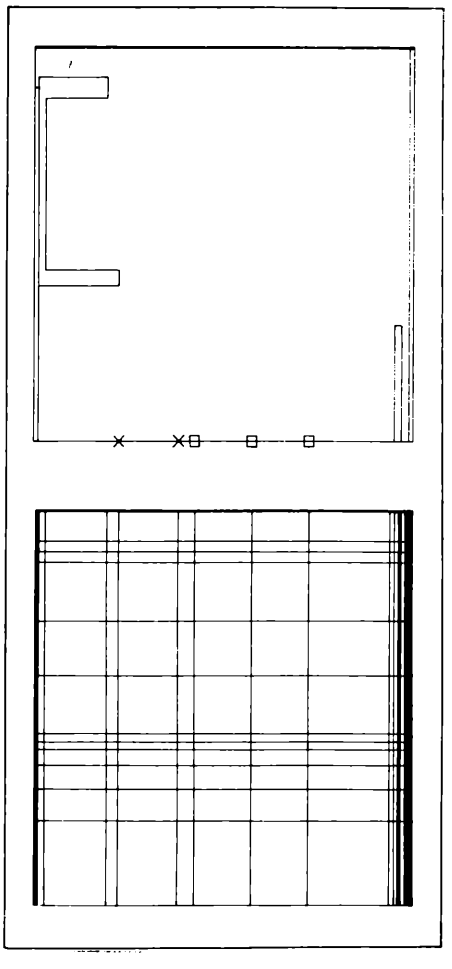


Bild 6. Feldbildausschnitt bei Vernetzung gemäß Bild 5

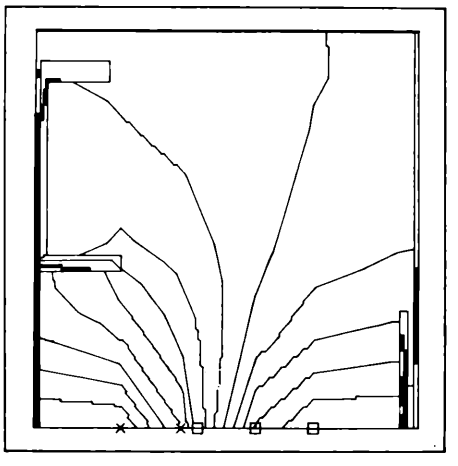
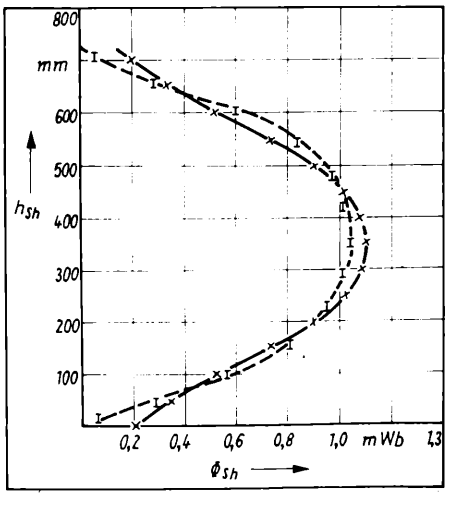


Bild 7. Flußverteilung im Stabshunt
X Messung; I Rechnung



Tafel 1. Verlustnachrechnung in Shunt und geschirmter Kesselwand

h mm	Δh mm	B_{n1} mT	$\Delta \Phi_1$ mWb	B_{n2} mT	$\Delta \Phi_2$ mWb	$\Delta \Phi_{Sh}$ mWb	Φ_{Sh} mWb	Φ_{Sh} mWb	B_{Sh} T	Δm_{Sh} kg	ΔP_{Sh} W	$\Delta \Phi_K/l_K$ 10^{-5} Wb m^{-1}	$H_{t\,max}$ A cm^{-1}	μ_{rel}	ΔP_K W
701	20	5,8	0,08	− 2,6	0,04	0,12	0,12	0,06	0,02	0,45	0,00	5,2	2,8	25,0	0,34
665	52	7,4	0,27	− 1,2	0,04	0,31	0,43	0,28	0,09	1,18	0,13	6,2	3,3	24,5	1,20
607	63	7,0	0,31	0,4	0,02	0,33	0,76	0,60	0,20	1,43	0,78	2,5	1,3	26,6	0,24
544	63	3,9	0,17	0,1	0,00	0,17	0,93	0,84	0,28	1,43	1,52	0,6	0,3	27,9	0,01
481	63	1,8	0,08	0,0	0,00	0,08	1,01	0,97	0,33	1,43	2,11	0,0	0,0	28,3	0,00
418	63	0,6	0,03	0,0	0,00	0,03	1,04	1,02	0,34	1,43	2,24	0,0	0,0	28,3	0,00
355	63	0,2	0,01	0,0	0,00	0,01	1,03	1,04	0,35	1,43	2,37	0,0	0,0	28,3	0,00
292	63	1,0	0,04	0,0	0,00	0,04	0,99	1,01	0,34	1,43	2,24	0,0	0,0	28,3	0,00
229	63	2,1	0,09	0,0	0,00	0,09	0,90	0,94	0,32	1,43	1,98	0,0	0,0	28,3	0,00
166	63	4,0	0,17	0,2	0,01	0,18	0,72	0,81	0,27	1,43	1,41	1,3	0,7	27,3	0,07
105	63	6,8	0,30	0,6	0,03	0,33	0,39	0,56	0,19	1,43	0,70	3,8	2,0	25,8	0,56
46	52	6,3	0,23	1,4	0,05	0,28	0,11	0,25	0,08	1,18	0,10	7,3	3,9	24,0	1,65
17	20	5,0	0,07	2,8	0,04	0,11	0,00	0,06	0,02	0,45	0,00	5,6	3,0	24,8	0,39
Summe											15,58				4,46
Meßwert											16,00				4,50

l_{Sh} = 710 mm, $l_{Sh\,ef}$ 594 mm, b_{Sh} 711 mm, d_{Sh} 5 mm, l_K l_{Sh} 710 mm

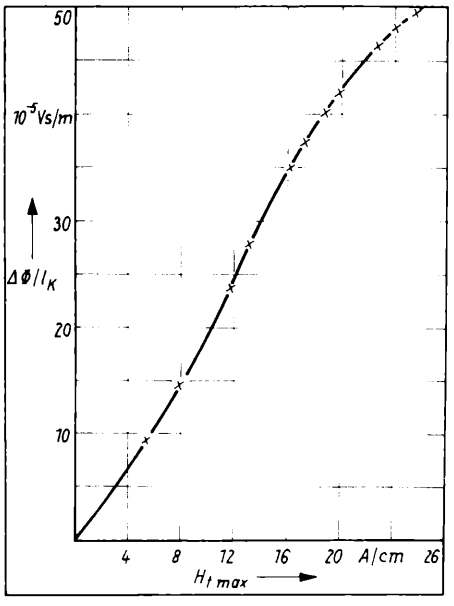


Bild 8
$H_{t\,max}$ $f(\Delta\Phi/l_K)$
nach [1]

Analog zu [5] wird für die Kesselwand und den Shunt mit μ_{rel} = konstant gerechnet, da der Einfluß einer veränderlichen Permeabilität bei μ_{rel} größer 100 für die Berechnung der Normalkomponente der magnetischen Induktion vernachlässigbar ist.
Ein Feldbild für den oberen Wickelraumausschnitt (Bild 6) unterstreicht die im Bild 2 enthaltene Modellvorstellung zur Aufteilung des magnetischen Flusses auf Shunt und Kessel.

4. Vergleich Rechnung und Messung

Tafel 1 enthält sie Zusammenstellung der Rechen- und Meßergebnisse für einen geometrisch verkleinerten Transformator erhöhter Frequenz (f = 500 Hz). Bild 7 zeigt eine Gegenüberstellung des gemessenen und berechneten Magnetflusses im Shunt.
Zur Verlustberechnung im Shunt wurde gemäß [3], als spezifischer Verlust für f = 500 Hz und B = 0,3 T, ein Wert von p_{Sh} = 1,22 W/kg eingesetzt, so daß die zugeschnittene Größengleichung für die Verluste eines Shuntabschnitts lautet:

$$\Delta P_{Sh/W} = 1{,}22\,(f_{Sh}/500\ \mathrm{Hz})^2\,(B_{Sh}/0{,}3\ \mathrm{T})^2\,\Delta m_{Sh/kg}. \qquad (15)$$

Der Verlustberechnung im geschirmten Kesselwandbereich lag der meßtechnisch ermittelte Zusammenhang $H_{t\,max} = f(\Delta\Phi_K/l_K)$, der im Bild 8 dargestellt ist, zugrunde. Die Werte für die Konstanten K und K_{Ft} betrugen mit $\varkappa_{Fe}$ = 6 m Ω^{-1} mm^{-2} nach [3]:

K 1,35; $K_{Ft} = 9{,}07 \cdot 10^{-6}$ VA^{-1}.

Für μ_{rel} der Kesselwand wurde die Approximationsbeziehung

μ_{rel} 8000/(10 + $H_{t\,max}$/A cm^{-1})

gewählt.

Die mit den angegebenen Gleichungen nachgerechneten Verluste in Tafel 1 weichen in der Summe für den Shunt und den geschirmten Kesselwandbereich um weniger als 5% von den Meßwerten ab.

5. Zusammenfassung

Die angegebenen Berechnungsalgorithmen ermöglichen die abschnittsweise Berechnung der Verluste in magnetischen Shunts und dem damit geschirmten Kesselteilen von Großtransformatoren. Ausgangspunkt der Berechnungen ist die mit Hilfe der MFD ermittelte Normalkomponente der magnetischen Induktion an der Oberfläche der Bauteile.
Die angeführten Nachrechnungen liefern trotz der getroffenen, vereinfachenden Annahmen Abweichungen von weniger als 5% gegenüber den Meßwerten.

Literatur

[1] *Kubusch, M.; Roseburg, D.:* Berechnung der durch den Streufluß hervorgerufenen Verluste im Kessel von Transformatoren. ELEKTRIE, Berlin 34 (1980) 3, S. 142 – 144
[2] *Brendler, W.; Kubusch, M.:* Berechnung des Streuflusses in magnetischen Kesselabschirmungen und in Transformatorkesseln. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 6, S. 307 – 313
[3] *Roseburg, D.:* Zusatzverluste in inaktiven Konstruktionsteilen von Großtransformatoren. Dissertation B, TU Dresden 1984
[4] *Roseburg, D.; Braune, R.:* Zweidimensionale Streufeldberechnung in Großtransformatoren. Wiss. Z. TU Dresden 36 (1987) 4, S. 103 – 108
[5] *Roseburg, D.; Körting, R.:* Einsatz von Kleinrechnern zur numerischen Streufeldberechnung in Großtransformatoren. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 10, S. 374 bis 376

EA 6016

Fortsetzung von Seite 213

[8] *Winkler, W.; Dawid, Z.; Razag, R.:* Anforderungen des Phasenvergleichsschutzes an die speisenden Stromwandler. Internationale Wiss. Konferenz „Schutzarten von Elektroenergieeinrichtungen in der Erzeugung und Verteilung der Elektroenergie", Brno 1987
[9] *Lanz, O. E.; Engler, F.; Hänggli, M.; Bacchini, G.:* LR 91 – ein ultraschnelles Richtungsvergleichsrelais für den Schutz von Hochspannungsleitungen. Brown Boveri Mitteilungen 1 (1985), S. 32
[10] *Chamia, M.; Liberman, S.:* Ultra high speed relay for ehv/uhv transmission lines – development, design and application. IEEE Trans. on PAS, Nr. 6, (1978), S. 2104
[11] *Forford, T.:* High speed differential protection for large generators. IEE Conference Publication No. 185, London (1980), S. 30
[12] *Har, M.:* Neue Differentialrelais für Transformatoren und Leitungen. Brown Boveri Mitteilungen 2 (1981), S. 70
[13] *Winkler, W.:* Verhalten von Vergleichsschutzsystemen bei transienten Stromwandlersättigungen. etz-Archiv 10 (1988) 10, S. 325
[14] *Fromm, W.; Maier, H. A.:* Vergleichsschutz von Hochspannungsleitungen nach dem Ladungsverfahren. etz-Archiv 9 (1987) 6, S. 181
[15] Siemens AG: 7SL72 Statischer Distanzschutz im Gehäuse
[16] *De Mesmeaker, I.; Steiner, Ch.:* Das Verhalten des Distanzrelais LZ 95 bei extremer Sättigung der Hauptstromwandler. Brown Boveri Mitteilungen 2 (1985), S. 78
[17] Siemens AG: Elektronischer Sammelschienenschutz 7SS10
[18] *Zwahlen, K. W.:* Statischer Sammelschienenschutz Typ LNX 5. Brown Boveri 1984

EA 6014

Überspannungsmeßgerät

D. Buchholz, KDT; J. Ermisch, KDT; Dresden; J. Freiburger, KDT; F. Hoppadietz, KDT; H. Schroth, KDT; H. Schwarz, KDT; Berlin

Mitteilung des VEB Transformatorenwerk „Karl-Liebknecht" Berlin und der Technischen Universität Dresden

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* zum 65. Geburtstag

Im Elektroenergiesystem auftretende, durch unterschiedliche Ursachen hervorgerufene Überspannungen können an exponierten Netzpunkten Werte erreichen, die sowohl zu einer sofortigen Zerstörung, als auch durch erhöhte Beanspruchung zu einer Registrierung der Lebensdauer elektrotechnischer Betriebsmittel führen. Es besteht daher das Bedürfnis, die Vorgänge im Netz zu analysieren. Hierzu ist es erforderlich, die Größe, den zeitlichen Verlauf, den Zeitpunkt des Eintritts und die Dauer der Überspannung meßtechnisch zu erfassen.

Von einem gemeinsamen Jugendforscherkollektiv des VEB Transformatorenwerk „Karl Liebknecht" und der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden wurde ein Überspannungsmeßgerät zum Einsatz in der Hochspannungsebene entwickelt. Aufbau und Wirkungsweise sowie erste Ergebnisse der Erprobung eines einpolig ausgeführten Musters werden nachfolgend beschrieben.

1. Aufbau und Wirkungsweise

Bei der Entwicklung wurde davon ausgegangen, im Interesse des universellen Einsatzes auf den Einbau eines besonderen Sensors am Meßort zu verzichten. Als zweite Prämisse war zu sichern, daß Messung und Registrierung automatisch erfolgt, da Überspannungen zufällig auftreten können. Darüber hinaus war die Hilfsenergieversorgung der elektronischen Baugruppen im Schaltfeld unabhängig vom Niederspannungsnetz oder der Stationsbatterie zu realisieren. Die Meßwerterfassung im Schaltfeld von Umspannwerken erfolgt ohne Aufstellung eines zusätzlichen hochspannungsführenden Gerätes; es wird ein vorhandener Stromwandler IT 123 benutzt (Bild 1). Dessen kapazitiver Meßbelag, der ansonsten zur Überprüfung des Zustandes der Hochspannungsisolation dient („tan δ-Belag"), bildet die Oberspannungskapazität eines gemischt kapazitiv-induktiven Teilers. Ergänzt wird dieser Teiler durch eine Unterspannungskapazität sowie einen primärseitig in Reihe zu den Kapazitäten geschalteten Übertrager, bei dem an einer Anzapfung der Primärwicklung ein der Netzspannung proportionales Spannungssignal abgegriffen werden kann. Die Sekundärwicklungen dieses Übertragers dienen zur Bereitstellung der Hilfsenergie für die am Wandler befindlichen elektronischen Baugruppen (Bild 1) [1]. Die Windungszahlen der Primärwicklungen sind so ausgelegt, daß die Bedingung $w_1 \ast C_1 = w_2 \ast C_2$ eingehalten wird. Unabhängig von der Belastung des Transformators durch den Hilfsenergieverbrauch der elektronischen Bauelemente bleiben die Proportionalität und der Phasenwinkel der abgegriffenen Spannung konstant (Bild 2). Diese Anordnung hat gegenüber der Hilfsenergieversorgung aus dem Niederspannungsnetz oder der Stationsbatterie den Vorteil, daß bei nichtstationären Vorgängen wie Blitzschlag oder stromstarkem Erdschluß keine Überspannungen aus der Stromversorgung in die Elektronik eingekoppelt werden können.

Das abgegriffene, der Netzspannung proportionale Spannungssignal wird mit Hilfe einer Sample-and-hold-Schaltung und eines Analog-Digital-Umsetzers abgetastet und digitalisiert.

Ein Einchipmikrorechner steuert den Umsetzprozeß und realisiert die Parallel-Seriell-Wandlung der Meßwerte, indem er den Umsetzvorgang des Analog-Digital-Umsetzers einleitet, die Sample-and-hold-Schaltung ansteuert und die Daten am Ausgang des Analog-Digital-Umsetzers einliest. Bei Verwendung eines 8-bit-Einchip-

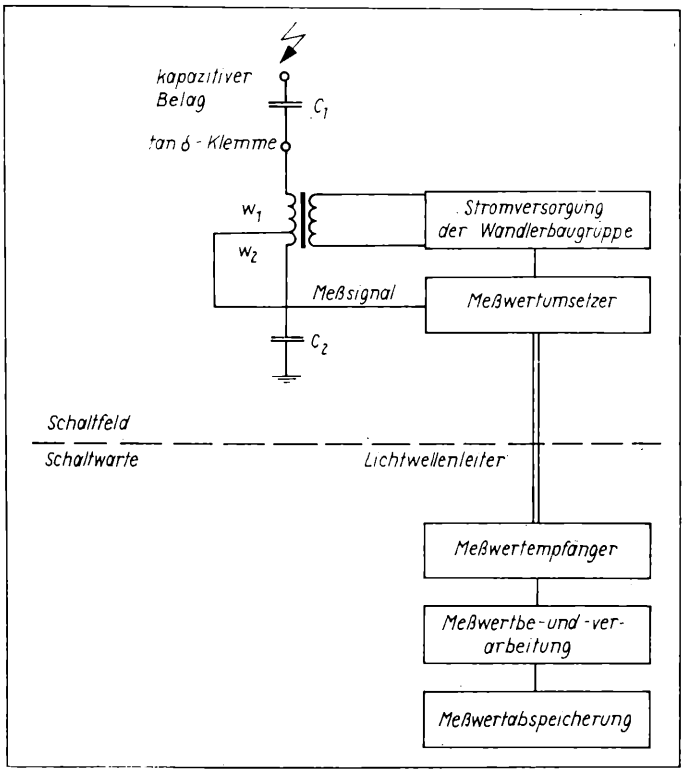


Bild 1. Blockschaltbild

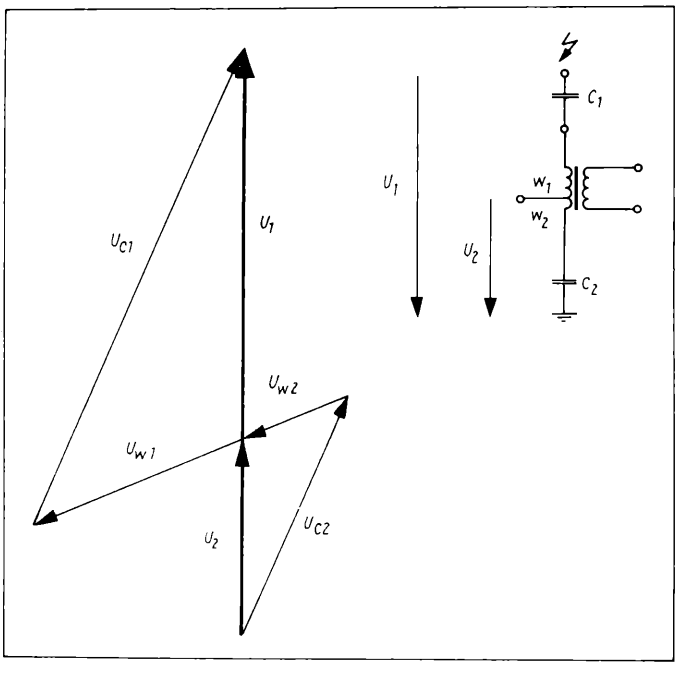


Bild 2. Zeigerbild

mikrorechners und eines 10-bit-Analog-Digital-Umsetzers wird jeder Meßwert in zwei Worte zu je 8 bit verschlüsselt, wobei die freien Bits durch die Parität und durch Kennzeichnungsbits aufgefüllt werden. Nach elektro-optischer Wandlung erfolgt die Übertragung der Meßwerte als Lichtsignal über eine Lichtwellenleiterübertragungsstrecke zur Warte.

Mit Hilfe einer Empfängerbaugruppe mit Einchipmikrorechner werden die opto-elektrische und Seriell-Parallel-Wandlung der Meßwerte sowie die Überwachung der Meßwertübertragung durch Auswertung der Paritätsbits und die Meßwertselektion vorgenommen. Die empfangenen Meßwerte werden in einem RAM abgelegt, und zwar so, daß mit Hilfe des RAM ein Ring gebildet wird, in dem bereits abgelegte Werte sequentiell durch aktuelle Werte ersetzt werden. Im Ring sind stets die Daten der mindestens zwei letzten Perioden des abgetasteten Analogvorgangs vorhanden. Innerhalb des Adreßbereichs dieses Speichers werden zwei Zeiger gesetzt, wobei der eine Zeiger auf Referenzwerte gerichtet wird und die

Dr.-Ing. *Frieder Hoppadietz* ist Laborleiter, Dr.-Ing. *Heike Schwarz*, Dipl.-Ing. *Jan Freiburger* und Dipl.-Ing. *Hagen Schroth* sind Mitarbeiter im Entwicklungslabor für Meßwandler des VEB Transformatorenwerk „Karl Liebknecht" Berlin; Dr. sc. techn. *Jochen Ermisch* ist Bereichsoberassistent, Dipl.-Ing. *Dirk Buchholz* wissenschaftlicher Assistent an der Technischen Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik.

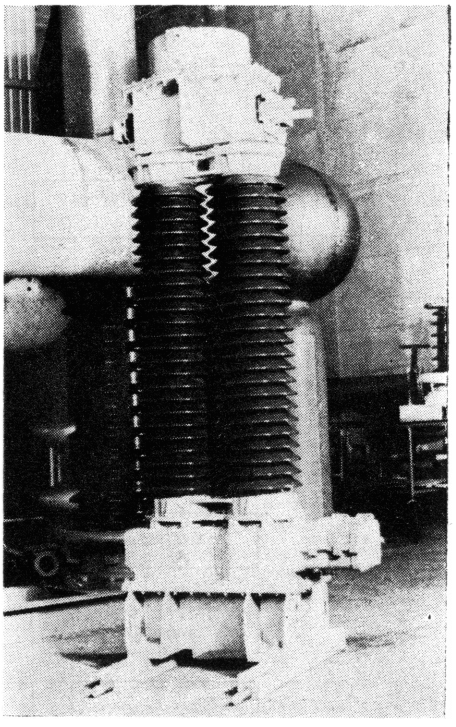


Bild 3
Wandler mit Senderbaugruppe

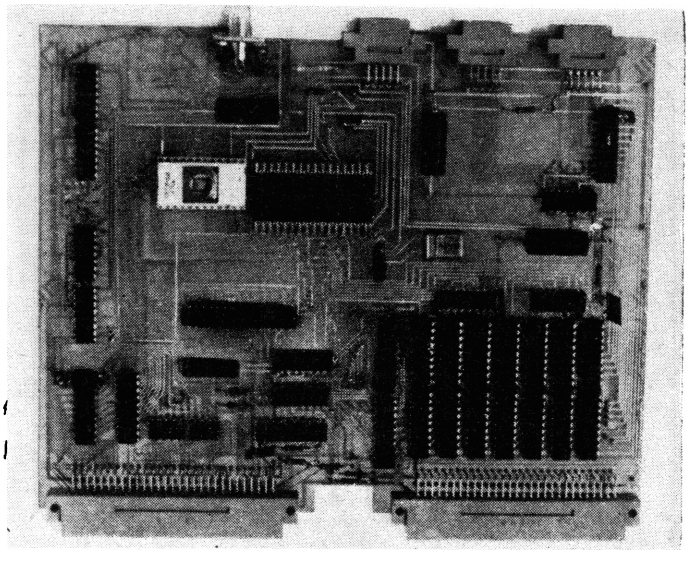


Bild 4
Empfängerplatine

darauf folgenden Abtastwerte mit diesen verglichen werden. So vergleicht der Einchipmikrorechner die Meßwerte der eingelaufenen Periode mit denen einer vorangegangenen Periode. Bei Abweichung einer vorgegebenen Anzahl von Meßwerten über festgelegte Toleranzgrenzen wird ein fehlerbehafteter Spannungsverlauf erkannt und zwischengespeichert. Zusätzlich zu den Meßwerten werden im Speicher Daten abgelegt, die zur Charakterisierung der Meßwerte dienen (Zeit, Datum, Kommentar). Nach Übergabe der Meßwerte an einen Mikrorechner MC 80/22 werden sie auf Magnetband gespeichert [2] [3]. Der Meßablauf erfolgt automatisch. Manueller Bedienaufwand entsteht nur beim Kassettenwechsel.
Zur Auswertung der aufgezeichneten Spannungsverläufe, die auf dem Bildschirm grafisch dargestellt werden können, wurde Software erstellt. Das entwickelte Gerät besteht konstruktiv aus drei Teilen:

1. einer Senderbaugruppe, die in einem serienmäßigen Klemmkasten des IT 123 angeordnet ist (Bild 3)
2. einem Lichtwellenleiter
3. einem Mikrorechner MC 80/22, wobei auf einem freien Steckplatz die Empfangsbaugruppe untergebracht ist (Bild 4). Der Klemmkasten mit der Senderbaugruppe wird an dem am Wandler bereits befindlichen zusätzlich montiert (Bild 5). Montageaufwand und -zeit (etwa 10 min) sind dadurch gering. Da die elektronischen Bauelemente der Senderbaugruppe aus dem zum Meßwerterfassungsglied gehörenden Übertrager gespeist werden, ist eine externe Hilfsenergieversorgung im Schaltfeld nicht notwendig.

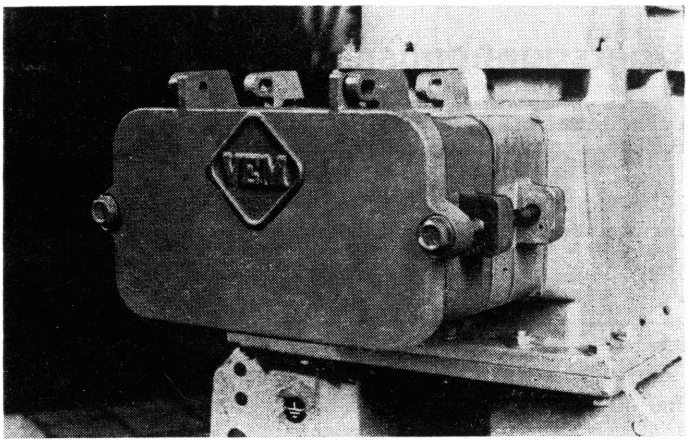


Bild 5. Senderbaugruppe

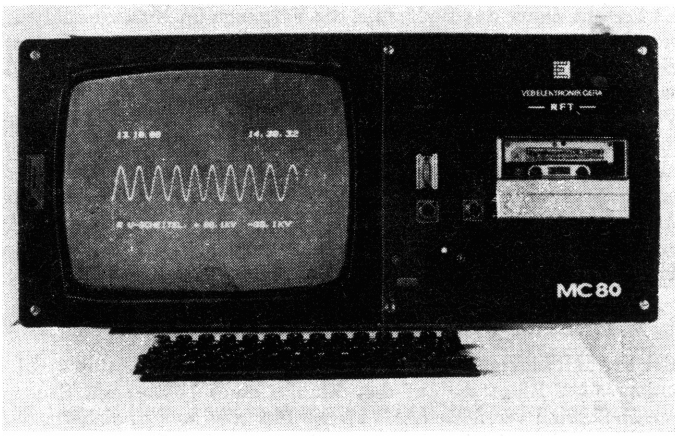


Bild 6. Rechner mit Auswerteprogramm

2. Betriebsfähigkeit bei nichtstationären Vorgängen (EMV)

Bei der Dimensionierung und Gestaltung der elektronischen Wandlerbaugruppe galt der Betriebsfähigkeit bei nichtstationären Vorgängen erhöhte Aufmerksamkeit.
Im Wickelschema des Übertragers für den gemischt kapazitiv-induktiven Hochspannungsteiler sind die langjährigen Erfahrungen des VEB Transformatorenwerk in der Entwicklung und im Bau von Hochspannungswandlern genutzt worden. Zusätzlich ist der Primärwicklung ein Kondensator parallel geschaltet, so daß Ströme höherer Frequenz entsprechend der Kapazität geteilt werden und die Spannungsbelastung des Übertragers vermindert wird. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme — ebenso die elektromagnetische Abschirmung der Elektronik — konnte mit einem Repetierstoßgenerator nachgewiesen werden. Von den Maßnahmen zur elektromagnetischen Abschirmung sollen hier besonders die doppelte Weißblechabschirmung, die Zuführung aller Signal- und Stromversorgungsleitungen über Durchführungsfilter und der Einsatz von Schaltdioden sowie Z-Dioden als Eingangsklemmenbeschaltung hervorgehoben werden.
Die komplett aufgebaute und an den IT 123 angeschlossene Baugruppe wurde nach TGL 20445/02 (Isolationskoordination- Stehspannungswerte für neue Geräte) und nach TGL 39758 (Stromwandler) geprüft. Beanspruchung in der folgenden Reihenfolge:

- 230 kV Wechselspannung; 1 min
- 3 mal Blitzspannung Vollwelle 1,2/50; + 550 kV
- 3 mal Blitzspannung Vollwelle 1,2/50; — 550 kV
- 230 kV Wechselspannung Funktionstest.

Die gefertigten Labormuster genügen damit den Forderungen der oben genannten Standards für Spannungsfestigkeit.

3. Ergebnisse

Das Überspannungsmeßgerät wird seit April 1988 in einem Umspannwerk unter Netzbedingungen in der 110-kV-Ebene erprobt[1]).

[1]) Wir danken den Kollegen *Behrendt* und *Lorenz* vom VEB BKW „Glückauf" Knappenrode für die freundliche Unterstützung.

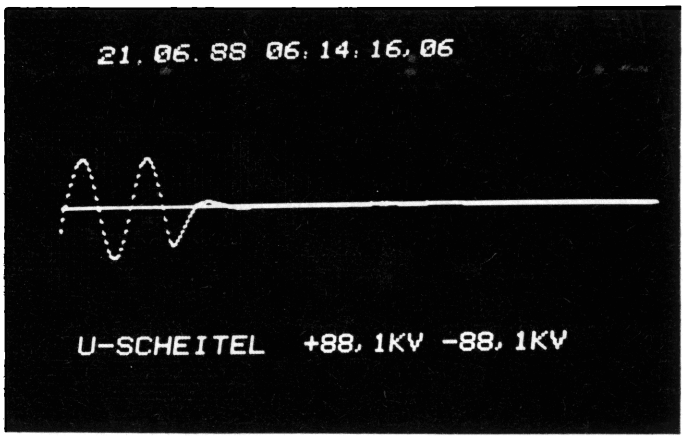


Bild 7. Netzabschaltung

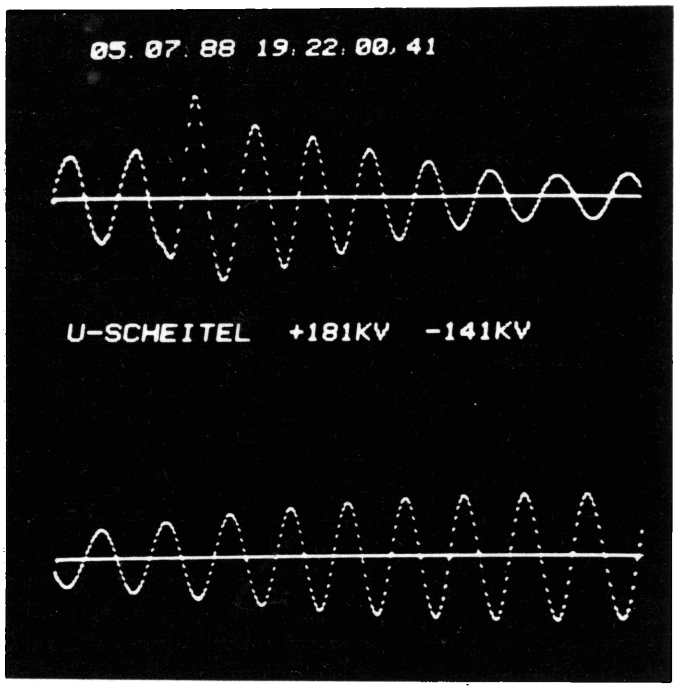


Bild 8. Einpoliger Erdschluß

Die auf Kassette gespeicherten Spannungsverläufe wurden im VEB Transformatorenwerk „Karl Liebknecht" mit Hilfe der dazu erstellten Software ausgewertet (Bild 6).

Erste Erprobungsergebnisse sollen an dieser Stelle vorgestellt werden. Aus einer Vielzahl vorliegender Meßergebnisse wurden ein Ausschaltvorgang sowie zwei Erdschlüsse ausgewählt (Bilder 7 bis 9).

Der Ausschaltvorgang (Bild 7) zeigt das Abklingen der Spannung vom Nennwert auf Null. Dabei wird deutlich,daß vor dem Abschalten 3 Halbwellen mit normaler Netzspannung als Vorgeschichte und anschließend der eigentliche Abklingvorgang aufgezeichnet wurden. Durch eine Pufferung der Versorgungsspannung für die elektronischen Baugruppen ist die Funktionsfähigkeit des Meßgeräts auch nach Abschalten der Spannung im Netz noch etwa 140 ms gewährleistet. So werden auch derartige Vorgänge aufgezeichnet.

Das zweite Beispiel (Bild 8) zeigt den Verlauf eines einpoligen Erdschlusses. Vom zunächst normalen Verlauf steigt die Spannung plötzlich auf einen Scheitelwert von 181 kV an. Danach klingt sie auf einen minimalen Wert unterhalb der normalen Leiter-Erde-Spannung (Scheitelwert 37 kV) ab, um sich dann allmählich dem Nennwert zu nähern. Hieraus können bei entsprechender Auswertung Rückschlüsse auf die Netzkonstellation gezogen werden.

Bei dem nachfolgend dargestellten Beispiel (Bild 9) handelt es sich um einen Erdschluß, bei dem die Netzspannung vom zunächst normalen Verlauf über zwei Perioden auf einen Scheitelwert von 45 kV (etwa 50 %) zusammenbricht. Es wird vermutet, daß bei dem zu diesem Zeitpunkt herrschenden Waldbrand in der Nähe der Übertragungsleitung durch Löschen mit Flugzeugen in einiger Entfernung ein mehrpoliger Erdschluß entstand. Anschließend blieb ein einpoliger Erdschluß bestehen. Die Spannung klingt von maximalen Scheitelwerten (+ 128 bzw. — 130 kV) sehr langsam ab. Nach etwa 320 ms erreicht die Erdschlußspannung ein Minimum, um danach wieder anzusteigen. Bild 9 zeigt den Gesamtverlauf über etwa 1 s. Das wird durch den zur Verfügung stehenden Speicherraum von 4 kByte ermöglicht.

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, daß das neue Meßverfahren einen Beitrag zur Erkennung und Klärung von nichtstationären Vorgängen im 110-kV-Netz leistet.

Literatur

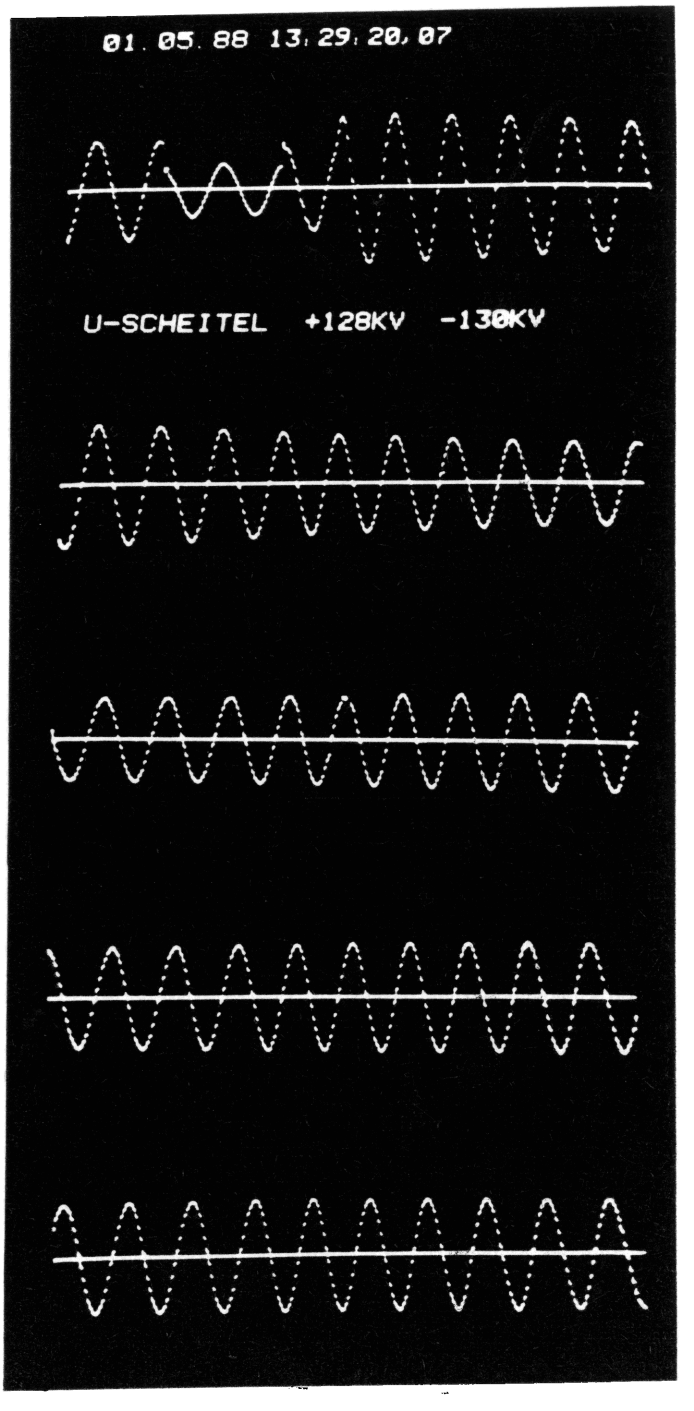
[1] *Brendler, W.; Ermisch, J.; Hoppadietz, F.:* DD; WP 225538

[2] *Brendler, W.; Buchholz, D.; Ermisch, J.; Freiburger, J.; Hoppadietz, F.; Schroth, H.; Schwarz, H.:* Einrichtung zur Messung und Erfassung von Größen in Hochspannungsnetzen. WP DD 3089401

[3] *Brendler, W.; Buchholz, D.; Ermisch, J.; Freiburger, H.; Hoppadietz, F.; Schroth, H.; Schwarz, H.:* Einrichtung zur Messung und Erfassung von mehreren verschiedenen Größen in Hochspannungsnetzen. WP DD 3089395

EA 6012

Bild 9. Zeitweiliger Doppelerdschluß mit nachfolgendem einpoligem Erdschluß



Prüfung und Anwendung von Schutzstromwandlern mit Schichtkernen

G. Gruhn, KDT, Leipzig

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* zum 65. Geburtstag

Schutzstromwandler mit Schichtkernen aus Dynamoblech werden für den Mittelspannungsbereich weiterhin gefertigt. Sie haben gegenüber den Stromwandlern mit Ringkernen aus Texturblech bekanntlich Besonderheiten, die auf den Einfluß der sekundären Streuinduktivität des Stromwandlers und die magnetischen Eigenschaften des Dynamoblechs zurückzuführen sind. Der derzeitig noch gültige Fachbereichstandard für Stromwandler [1] enthält Vorschriften zur Prüfung von Schutzstromwandlern der Klasse P, wobei die Prüfung auf Einhaltung der Klasse bei Nennstrom und beim Genauigkeitsnenngrenzfaktor zu erfolgen hat. Der Nachweis einer Fehlerklasse durch zwei Prüfpunkte erscheint infolge der komplizierten Feldverhältnisse im Schichtkernstromwandler zweifelhaft [2] und muß einer tiefergehenden Betrachtungsweise unterzogen werden.

Mit dem Einsatz elektronischer und digitaler Schutzgeräte werden an Schutzstromwandler höhere Anforderungen gestellt. Sie sind einerseits darin begründet, daß derartige Geräte teilweise die Kurzschlußübergangsvorgänge verarbeiten und bewerten und somit Schutzstromwandler diese Vorgänge innerhalb definierter Fehlergrenzen übertragen müssen, andererseits solche Geräte kleinere Fehlergrenzen als konventionelle Schutzgeräte haben, so daß auch Schutzstromwandler diesem Trend folgen müssen, um den Forderungen nach höherer Selektivität des Netzschutzes gerecht zu werden. Dieser Entwicklung folgt die IEC-Publikation Nr. 185 [3], indem zusätzlich zur Klasse P die Klassen TPS, TPX, RPY und TPZ eingeführt wurden. Ringkernwandler der Klasse P werden mitunter zugleich durch die Kenngrößen der Klasse TPS bzw. dieser Klasse zuordenbaren Kenngrößen ausgewiesen und sind somit zur Übertragung stationärer und verlagerter Kurzschlußvorgänge gezielt auswählbar. Dieser Beitrag soll klären helfen, inwiefern auch Schichtkernwandler diesen Anforderungen genügen können.

1. Fehlerkennlinien von Stromwandlern der Klasse P

Schutzstromwandler der Klasse P werden durch den Stromfehler

$$F_I = \frac{K_n I_s - I_p}{I_p} \cdot 100\,\% \qquad (1)$$

und Fehlwinkel δ bei Nennstrom und den Gesamtfehler

$$F_g = \frac{100\,\%}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_s - i_p)^2 \, dt} \qquad (2)$$

beim Genauigkeitsnenngrenzfaktor P ausgewiesen, wobei vorgegebene Fehlergrenzen nach [1] einzuhalten sind.

In den Bildern 1 und 2 sind die gemessenen Fehlerkurven für einen Ringkernstromwandler aus Texturblech als ausgezogene Linien für verschiedene Bürden dargestellt. Charakteristisch für derartige Wandler ist, daß ein praktisch ausgesprochen linearer Übertragungsbereich existiert, da in diesem die Fehler in guter Näherung konstant sind und infolge des kleinen Fehlwinkels der Gesamtfehler gleich dem Stromfehler ist. Hierin ist letztlich eine Begründung der Prüfvorschrift mit zwei Prüfpunkten zu finden, weil die Fehlerkurven vom Fehler bei Nennstrom kurz vor dem Wert des Genauigkeitsnenngrenzfaktors scharf abknicken. Der Projektant hat somit die Sicherheit, im linearen Übertragungsbereich die Fehlergrenzen bei Nennstrom nicht zu überschreiten.

Ein anderes Fehlerverhalten offenbaren Schutzstromwandler in Schichtkernausführung mit Dynamoblech. Die Bilder 3 und 4 zeigen die gemessenen Fehlerkurven wiederum als ausgezogene Linien.

Prof. Dr. sc. techn. *Gerhard Gruhn* ist Wissenschaftsbereichsleiter an der Sektion Automatisierungsanlagen der Technischen Hochschule Leipzig.

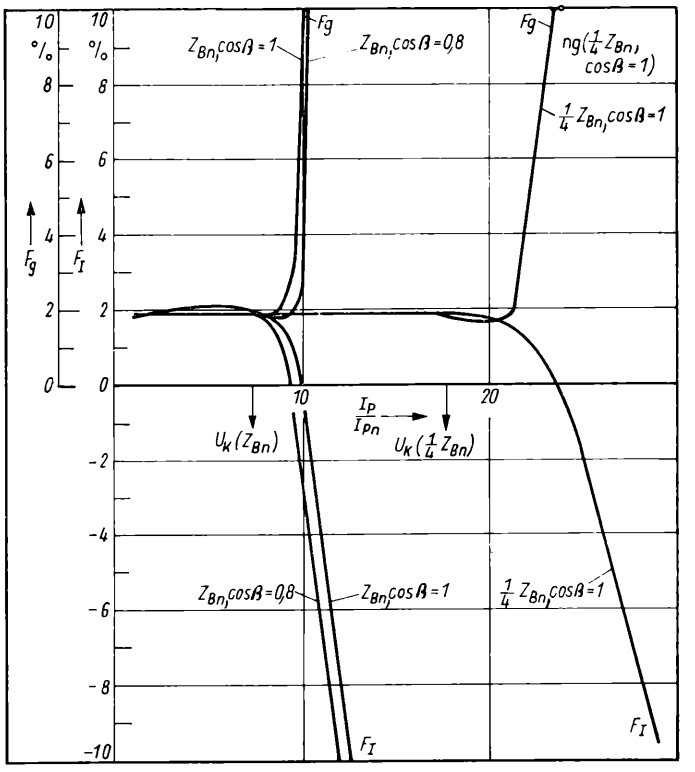


Bild 1
Gesamtfehler und Stromfehler der Effektivwerte KSC 0,75, 150 A/5 A, S_n = 15 VA, 10 P 10

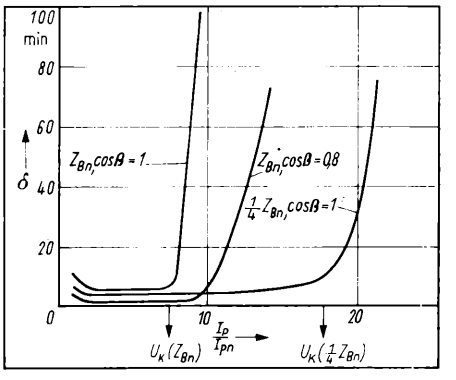
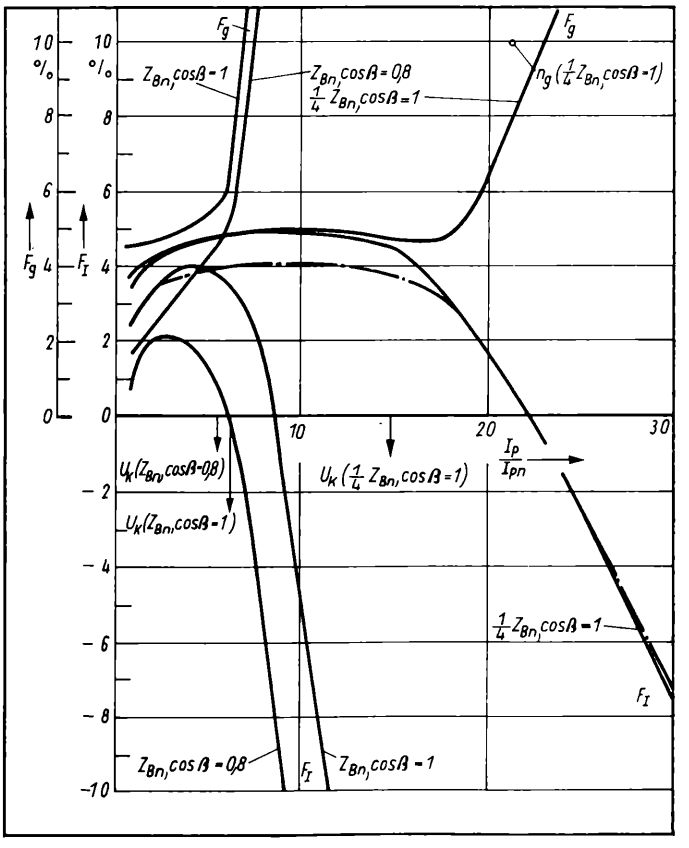


Bild 2
Fehlwinkel KSC 0,75, 150 A/5 A, S_n = 15 VA, 10 P 10

Bild 3
Gesamtfehler und Stromfehler der Effektivwerte GS 12 c, 150 A/1 A/1 A, S_n = 7,5 VA Kl. 0,5, $n < 10$, S_n = 30 VA 10 P 8



Charakteristisch ist, daß der lineare Übertragungsbereich nicht so ausgeprägt ist wie beim Ringkernwandler, da es kaum einen Bereich gibt, in dem die Fehler konstant sind und daß sich infolge des größeren Fehlwinkels Gesamtfehler und Stromfehler auch weit unterhalb des Genauigkeitsnenngrenzfaktors unterscheiden. Zwar können durch entsprechenden Windungsabgleich die vorgegebenen Fehlergrenzen bei Nennstrom und Nennbürde über einen gewissen Übertragungsbereich, der allerdings kleiner als bei Ringkernwandlern mit Texturblech ist, eingehalten werden, jedoch übersteigen insbesondere die Stromfehler bei Unterbürdung die festgelegte Fehlergrenze bei Nennstrom, und sie werden unvertretbar groß. Untersuchungsergebnisse weiterer Stromwandler sind in [4] dargestellt. Bei Unterbürdung können im linearen Übertragungsbereich die Stromfehler durchaus im Extremfall auf 8 % ansteigen. Bedenkt man, daß sich mit Einführung der neuen Schutzgerätegeneration auch deren Fehlergrenzen verkleinern und im Bereich zwischen 1 % und 5 % liegen, so muß dem auch seitens der Stromwandlerhersteller Rechnung getragen werden. Da der Stromfehler systematischen Ursprungs ist, wäre als Mindestmaßnahme eine Änderung des Windungszahlabgleichs vorzuschlagen, damit im linearen Übertragungsbereich die Fehlergrenze des Nennstromwertes eingehalten wird. Die Konsequenz für einen überarbeiteten Fachbereichstandard wäre allerdings, daß die Fehlergrenze vom Nennstromwert bis zum 0,8-fachen des Fehlergrenzstromes ($P \cdot I_{pn}$) einzuhalten ist und die Nennbürdenwerte und Genauigkeitsnenngrenzfaktoren den Erfordernissen der neuen Schutzgerätegenerationen angepaßt werden.

2. Umrechnung der Übertragungsbereiche bei Bürdenänderung von Stromwandlern der Klasse P

Weicht die tatsächliche Bürde von der Nennbürde des Schutzstromwandlers der Klasse P ab, so muß der dieser Bürde zugeordnete Übertragungsbereich abgeschätzt werden. Er berechnet sich als Überstromfaktor

$$n_g = \frac{P \sqrt{(R_{Bn} + R_s)^2 + (X_{Bn} + X_{\sigma s})^2}}{\sqrt{(R_B + R_s)^2 + (X_B + X_{\sigma s})^2}}, \tag{3}$$

wobei R_s, $X_{\sigma s}$ die Innenbürde ist und R_{Bn}, R_B bzw. X_{Bn}, X_B die jeweiligen Anteile der Nenn- bzw. davon abweichenden Bürde sind. Für einen Bürdenwert von 1/4 Z_{Bn} ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit dem Meßwert (Bild 1). Die Gleichung (3) ist bei Ringkernstromwandler generell anwendbar, liefert aber auch bei Schichtkernwandlern eine hinreichende Übereinstimmung, wie Bild 3 zeigt. Größere Ungenauigkeiten sind zu erwarten, wenn der sekundäre Streublindwiderstand die Umrechnung stärker beeinflußt. Dem Wandlerhersteller bereitet es Schwierigkeiten, den Streublindwiderstand als Kenngröße auszuweisen, da er keine Konstante ist. Sofern aber Umrechnungen über große Bürdenbereiche nicht erforderlich sind, d.h. die Nennleistung dem Leistungsbedarf der Schutzgeräte besser angepaßt ist, kann man in guter Näherung mit einem konstanten Streublindwiderstand rechnen [4]. Der Nachweis wird über ein Umrechnungsverfahren auf der Basis gleicher Induktion für die Betriebszustände 1 und 2 erbracht (Bild 5). Vorausgesetzt wird die Gültigkeit der Grundwellentheorie.

Für die Betriebszustände 1 und 2 sind die Gesamtbürden

$$Z_1 = \sqrt{(R_{B1} + R_s)^2 + (X_{B1} + X_{\sigma s})^2} \tag{4}$$

und

$$Z_2 = \sqrt{(R_{B2} + R_s)^2 + (X_{B2} + X_{\sigma s})^2}. \tag{5}$$

Dann ist der Sekundärstrom des Betriebszustandes 2 für einen gegebenen Primärstrom des Betriebszustandes 1

$$I_{s2} = I_{p1} \frac{1 + F_{11}}{K_n} \frac{Z_1}{Z_2}. \tag{6}$$

Der zugehörige Primärstrom des Betriebszustandes 2 wird berechnet aus

$$\frac{I_{p2}^2}{I_{p1}^2} = 1 + \frac{N_s^2}{N_p^2 K_n^2}(1 + F_{11})^2 \left[1 + \frac{Z_1^2}{Z_2^2} - \frac{2(R_1 R_2 + X_1 X_2)}{Z_2^2}\right] - 2\frac{N_s}{N_p K_n}(1 + F_{11}) \times \left[\left(\frac{R_1 R_2 + X_1 X_2}{Z_2^2} - 1\right)\cos\delta_{11} - \frac{X_1 R_2 - X_2 R_1}{Z_2^2}\sin\delta_{11}\right]. \tag{7}$$

$$R_1 = R_{B1} + R_s, \tag{8}$$

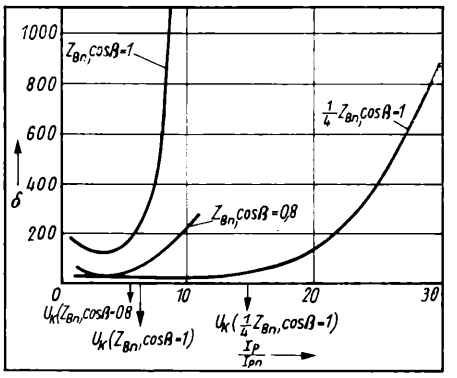


Bild 4
Fehlwinkel, GS 12 c, 150 A/1 A/1 A
S_n = 7,5 VA, Kl. 0,5, $n < 10$, S_n = 30 VA, 10 P 8

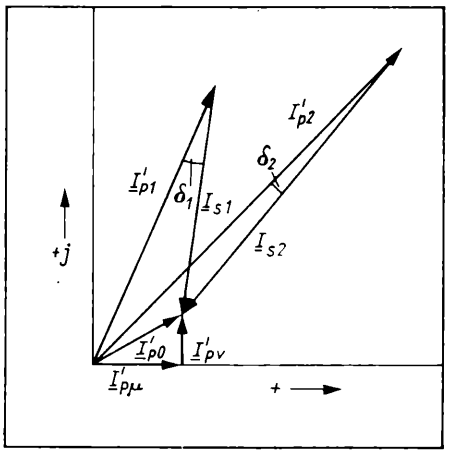


Bild 5
Zeigerbild

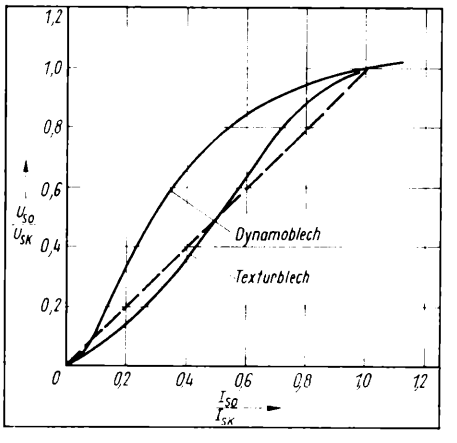


Bild 6
Normierte Erregerkennlinien

$$R_2 = R_{B2} + R_s, \tag{9}$$

$$X_1 = X_{B1} + X_{\sigma s}, \tag{10}$$

$$X_2 = X_{B2} + X_{\sigma s}. \tag{11}$$

Der Stromfehler der Effektivwerte kann damit für den Betriebszustand 2 berechnet werden. Es ist

$$F_{12} = \frac{K_n I_{s2} - I_{p2}}{I_{p2}}. \tag{12}$$

Nach dem Cosinussatz erhält man für den Fehlwinkel

$$\delta_2 = \arccos \frac{I_{p1}^2 + \ddot{u} I_{s1}^2 - 2\ddot{u} I_{p1} I_{s1}\cos\delta_1 - I_{p2}^2 - \ddot{u} I_{s2}^2}{2\ddot{u} I_{p2} I_{s2}}. \tag{13}$$

Hierin ist $\ddot{u}$ das Windungszahlübersetzungsverhältnis, das in Näherung durch das Nennübersetzungsverhältnis ersetzt werden kann. Die Stromfehlerkennlinie für die Umrechnung von Z_{Bn}, $\cos\beta = 0{,}8$ auf 1/4 Z_{Bn}, $\cos\beta = 1$ ist im Bild 3 als strichpunktierte Kennlinie dargestellt. Vor allem im Überstrombereich wird recht gute Übereinstimmung erzielt, obwohl der Bereich der Umrechnung schon relativ groß gewählt ist.

3. Schutzstromwandler mit Kniepunktkenngrößen

Derartige Stromwandler werden durch die Kniepunktspannung und den zugehörigen Effektivwert des Erregerstroms ausgewiesen und sollen einen prozentualen Windungszahlabgleich kleiner als

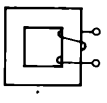
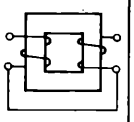
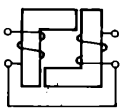
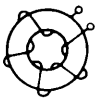
Variante	1	2	3	4
				
bezogene Kosten K	1	1,05	1,04	1,26
Nennüberstromzahl n	11	14,8	15,8	18,4
K/n	0,091	0,071	0,066	0,068
$K/\frac{I_p}{I_{pn}}(U_K)$	0,16	0,11	0,1	0,125

Bild 7. Variantenvergleich

$\pm$ 0,25% haben. Dabei ist die Kniepunktspannung der Effektivwert der bei geöffneter Primärwicklung an die Sekundärklemmen des Wandlers angelegten sinusförmigen Wechselspannung von Nennfrequenz, deren Wert gerade so groß ist, daß bei weiterer Steigerung um 10% eine Erhöhung des Effektivwertes des Erregerstroms um 50% eintritt. Für die Klasse TPS wird nach IEC [3] eine Erregerstromerhöhung von 100% zugelassen. Im Bild 6 ist je eine typische Erregerkennlinie für einen Ringkernwandler mit Texturblech und einen Schichtkernwandler mit Dynamoblech dargestellt. Erregerspannung und Erregerstrom sind auf die Kniepunktwerte bezogen. Typisch für den Ringkernwandler mit Texturblech ist, daß die 45°-Gerade die Erregerkennlinie bei dem Wert $U_{so}/U_{sk} \approx I_{so}/I_{sk} \approx 0{,}5$ schneidet, während die Dynamoblechkennlinie diesen Schnittpunkt bei sehr kleinen Werten hat. Demzufolge kann man eigentlich nur bei Ringkernwandlern mit einer konstanten Hauptinduktivität und somit auch Wandlerzeitkonstanten dynamische Vorgänge mit hinreichender Genauigkeit nach der linearen Theorie berechnen, während bei Schichtkernwandlern mit Dynamoblech nur eine zulässige Aussteuerungsgrenze festlegbar ist. Bei der Vorausberechnung dynamischer Vorgänge mit der aus den Kniepunktwerten berechneten Hauptinduktivität sind also größere dynamische Fehler zu erwarten.

Sollen Stromwandler der Klasse P zur Übertragung verlagerter Kurzschlußvorgänge, hier als dynamische Vorgänge bezeichnet, eingesetzt werden, so dürfen sie nicht bis zum Fehlergrenzstrom ausgesteuert werden. Nach (14) kann aus der Kniepunktspannung U_{sk} der zulässigen Effektivwert des Primärstromes gemäß

$$\frac{I_p}{I_{pn}} = \frac{U_{sK}}{I_{sn}(1+F_1)\sqrt{(R_B+R_s)^2+(X_B+X_{\sigma s})^2}} \tag{14}$$

berechnet werden. Diese Werte sind in die Bilder 1 bis 4 eingetragen. Schutzstromwandler der Klasse P sind demnach bei dynamischen Vorgängen bis zu folgenden Stromwerten aussteuerbar [4]:

Ringkernwandler $I_p/I_{pn} \approx (0{,}8 \cdots 0{,}9)\, P,$ (15)

Schichtkernwandler $I_p/I_{pn} \approx (0{,}7 \cdots 0{,}8)\, P.$ (16)

Somit ist für diese Wandler die Kniepunktspannung mit Hilfe des Genauigkeitsnenngrenzfaktors abschätzbar. Dem Projektanten von Schutzeinrichtungen ist damit eine Hilfe bei der Projektierung unter Berücksichtigung dynamischer Vorgänge gegeben [5], zumal Schutzstromwandler für den Mittelspannungsbereich derzeitig in der DDR noch nicht durch die Kniepunktwerte ausgewiesen werden.

4. Zusammenfassung

Schutzstromwandler in Ringkernausführung aus Texturblech unterscheiden sich in ihrem Fehlerverhalten von Schichtkernwandlern aus Texturblech beträchtlich. Während für Ringkernwandler der Klasse P die Prüfvorschrift ausreichend ist, muß sie für Schichtkernwandler geändert werden, um auch im Überstrombereich von I_{pn} bis etwa $(0{,}7 \cdots 0{,}8)\, P\, I_{pn}$ eine Fehlergrenze für den Stromfehler und Fehlwinkel zu garantieren. Das wird erforderlich, da zukünftige Schutzgerätegenerationen durch kleinere Fehlergrenzen gekennzeichnet sind und auch seitens der Wandlerhersteller der Forderung nach erhöhter Selektivität nachgekommen werden muß. Es wird ferner erforderlich, die Nennbürdenwerte und Genauigkeitsnenngrenzfaktoren den Nennleistungen dieser Schutzgeräte besser anzupassen. Unter diesen Bedingungen ist es vertretbar, den sekundären Streublindwiderstand zusätzlich zum sekundären Wicklungswiderstand als Kenngröße auszuweisen. Ringkernwandler der Klasse P können zur Übertragung verlagerter Kurzschlußvorgänge eingesetzt werden. Für Schichtkernwandler trifft das nur mit Einschränkung zu. Eine Beziehung zur Bestimmung der zulässigen Aussteuerung und somit der Kniepunktspannung wird angegeben. Zusätzlich sei angemerkt, daß verteilte Sekundärwicklungen sowie eine schwache Scherung sehr günstig auf das Übertragungsverhalten der Schichtkernstromwandler wirken. Dazu zeigt Bild 7 eine grobe Kostenabschätzung in bezogenen Werten. Fehlerkennlinien sind in [4] angegeben. Die angegebene Nennüberstromzahl bezieht sich auf den Stromfehler der Effektivwerte und einen Bürdenleistungsfaktor $\cos\beta = 1$. Bewertet man die Kosten mit der Nennüberstromzahl, so ist der Vorteil der Varianten 2 bis 4 unverkennbar. Werden die Kosten mit den Strömen der Kniepunktaussteuerung bewertet, ergeben sich dieselben Vorzugsvarianten. Wandlerhersteller sollten hieraus Konsequenzen ziehen.

Literatur

[1] TGL 39758 Stromwandler, Ausg. November 1982

[2] *Peinelt, W.:* Untersuchungen des magnetischen Feldes im Schenkelkern-Stromwandler unter Berücksichtigung des Überstromgebietes. Dissertation A, TU Dresden, 1988

[3] *Kunckel, K.-H.; Brendel, W.:* Neue Klassifizierung bei Stromwandlern für Schutzzwecke nach IEC. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 9, S. 350–352

[4] *Gruhn, G.:* Zur Bestimmung der Kenngrößen von Stromwandlern für den elektronischen Mittelspannungsnetzschutz. Dissertation B, Technische Hochschule Leipzig, 1984

[5] Bebürdung von Stromwandlern, Projektierungsvorschriften des VEB Kombinat Automatisierungsanlagenbau. Ordnungs-Nr. 6.3/12.88, verbindlich ab 1. 4. 88

EA 6013

Dynamischer RAM 4 Mbit hybrid 16 M 61256

Vorläufige technische Kurzinformation von der Leipziger Frühjahrsmesse 1989

Der Hybridschaltkreis ist ein hochintegrierter dynamischer Schreib-Lese-Speicher mit wahlfreiem Zugriff. Er verfügt über eine Speicherkapazität von 4 Mbit, die als Speicherblock von 256 kByte organisiert ist. Alle Ein- und Ausgänge sind TTL-kompatibel. Als Bauelemente werden dRAMs vom Typ U 61256 des Kombinats VEB Carl Zeiss JENA auf einem A 1203-Verdrahtungsträger in DIL-Bauform verwendet. (Anschlußraster 2,5 mm, Reihenabstand 37,5 mm, Abmessungen 43 mm × 42 mm × 5 mm). Auf dem Hybridspeicher sind weiterhin die Keramik-Kondensatoren zur Abblockung der Betriebsspannung integriert.

Technische Daten	min.	max.
Kurzcharakteristik		
Zugriffszeit RAS	150 ns	
Zugriffszeit CAS	45 ns	
Adreßzugriffszeit	80 ns	
Zykluszeit	260 ns	
Grenzwerte		
Betriebsspannung	– 0,5	7,0 V
Eingangsspannung	– 1,0	7,0 V
Umgebungstemperatur	0	70°C
Datenausgang	– 50	50 mA
Betriebsbedingungen		
Betriebsspannung	4,5	5,5 V
Eingangs-High-Spannung	2,4	5,5 V
Eingangs-Low-Spannung	– 0,3	0,8 V
Übergangszeit TTHL → TTLH	3	30 ns

Chr. Bittner, Hermsdorf

Berechnung der Verluste in elektromagnetisch abgeschirmten Preßstangen von Transformatoren

M. Kubusch, KDT, Finsterwalde

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* zum 65. Geburtstag

In Großtransformatoren werden zur Beherrschung der Stromkräfte die Wicklungen mit Preßstangen axial vorgespannt. Sie befinden sich in unmittelbarer Wicklungsnähe (Bild 1), d.h. im Bereich großer magnetischer Feldstärken. Zur Verringerung der Zusatzverluste und Vermeidung örtlicher Übertemperaturen werden Preßstangen aus Konstruktionsstahl mit Hilfe eines darübergeschobenen Kupfer- bzw. Aluminiumrohres vom magnetischen Feld abgeschirmt.
Die Wirksamkeit einer solchen elektromagnetischen Preßstangenabschirmung wird im folgenden untersucht.

1. Theorie nach Lasocinski [1]

Bild 1 zeigt die typische Verteilung der Normalkomponente B_n sowie der Tangentialkomponente B_t der Streufeldinduktion entlang der Spulenhöhe im Bereich zwischen Wicklung und Kessel, d.h. im Bereich der Preßstangen. Angesichts dieser Verteilung der beiden Induktionskomponenten gilt mit bestimmter Näherung, daß der Abschnitt in der Mitte der Preßstange im gleichmäßigen Längsfeld und die Abschnitte in Höhe der Wicklungsenden im gleichmäßigen Querfeld liegen. Diese Annahme ermöglicht den Charakter der Erscheinungen in der Preßstange und in deren Abschirmung relativ einfach zu bewerten und Hinweise hinsichtlich der Konstruktion der Abschirmung zu erhalten.
Lasocinski untersuchte deshalb die Abschirmwirkung im Längsfeld bzw. Querfeld mit folgenden Annahmen:

Dr.-Ing. *Martin Kubusch* war zur Zeit der Bearbeitung des Themas wissenschaftlicher Assistent an der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden.

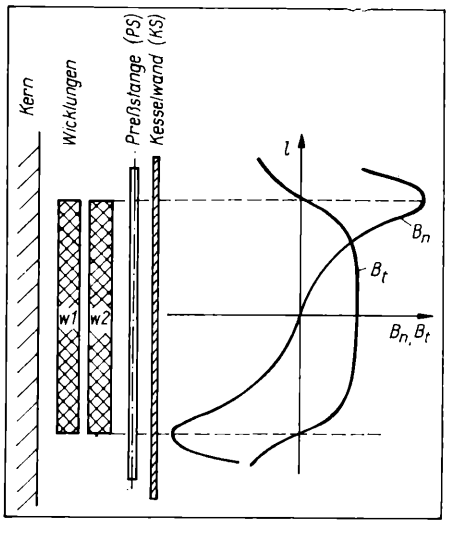


Bild 1
Typische Verteilung der Normalkomponente B_n und Tangentialkomponente B_t der Streufeldinduktion im Bereich zwischen Wicklung und Kessel

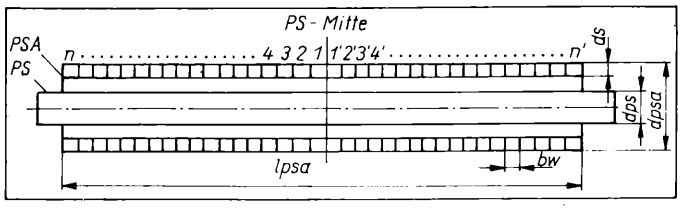


Bild 2. Unterteilung der PSA in Wirbelstrombahnen

- vor Einbringung der Preßstange (*PS*) ist das Feld homogen
- die Preßstange ist unendlich lang und über ihrer gesamten Länge abgeschirmt
- die Permeabilität der Preßstange ist konstant
- das Feld verändert sich zeitlich sinusförmig
- die Preßstangenabschirmung (*PSA*) liegt an der *PS*-Oberfläche an
- die Dicke der *PSA* ist sehr klein gegenüber dem Durchmesser der *PSA* (Übergang zum kartesischen Koordinatensystem).

Aus den Gleichungen des magnetischen und elektrischen Feldes für ein solches Zweimedienproblem (*PSA* und *PS*) werden Abschirmungsfaktoren abgeleitet.

2. Wirbelstromtheorie

Eine weitere Berechnungsmethode, die Wirbelstromtheorie, wird im folgenden vorgestellt. Sie berücksichtigt

- die Inhomogenität des magnetischen Feldes
- die endliche Länge der *PS* und der *PSA*
- den Abstand zwischen *PS* und *PSA*.

Auch hier erfolgt eine getrennte Berechnung der Abschirmwirkung einer *PSA* im Längs- bzw. Querfeld, jedoch kann die gegenseitige Beeinflussung durch die Wirbelströme in den beiden Ebenen mit einem iterativen Berechnungsgang berücksichtigt werden.

2.1. Berechnung der Abschirmwirkung einer Preßstangenabschirmung im Längsfeld

Nach [4] ist es möglich, den Fluß in der Preßstange ohne Preßstangenabschirmung zu berechnen.
Der sich zeitlich ändernde, die Preßstange (*PS*) axial durchsetzende Streufluß bewirkt in der die *PS* ummantelnden, elektrisch gut leitenden Preßstangenabschirmung (*PSA*) eine Spannungsinduktion. Die angetriebenen Wirbelströme haben ein Magnetfeld zur Folge, das dem ursprünglichen Magnetfeld entgegengerichtet ist. Die *PS* wird vom Fluß entlastet.
Um die Wirbelströme ermitteln zu können, wird die *PS* gedanklich in differentielle Abschnitte, den Wirbelstrombahnen, unterteilt (Bild 2). Die Anzahl der Wirbelstrombahnen ist infolge der symmetrischen Feldverteilung $2n$, d.h., der Wirbelstrom der Bahn 1 ist gleich dem Wirbelstrom der Bahn 1' usw. Die Breite einer Wirbelstrombahn beträgt $bw = lpsa/(2n)$. Über das elektrische Ersatzschaltbild für die Wirbelstrombahnen ist es möglich, die n Wirbelströme zu berechnen.
Im Bild 3 wird das elektrische Ersatzschaltbild der μ-ten Wirbelstrombahn angegeben.
Der die Eisenverluste repräsentierende Widerstand R_{Fe} darf bei einer wirkungsvollen *PSA* vernachlässigt werden, so daß Bild 4 gilt.
Den Programmablaufplan zur Berechnung der Verlustdichteverteilung sowohl in der abgeschirmten *PS* als auch in der *PSA* zeigt Bild 5. In den folgenden Unterpunkten sollen die dort angeführten Rechenschritte erläutert werden.

A: Berechnung des Flusses in der *PS* ohne *PSA* erfolgt mit der Spiegelungstheorie [5].

C 1: Spannungen

Die treibenden Spannungen $\underline{U}\ \mathrm{oa}_\mu$ werden vom Fluß $\underline{\Phi}\ \mathrm{oa}_\mu$ induziert, der die μ-te Wirbelstrombahn durchsetzt:

$$\underline{U}\ \mathrm{oa}_\mu = \mathrm{j}\,\omega\,\underline{\Phi}\ \mathrm{oa}_\mu . \tag{1}$$

C 2: Ohmsche Widerstände

Die ohmschen Widerstände der Wirbelstrombahnen ergeben sich aus

$$R\ \mathrm{wir}_\mu = \frac{1}{\varkappa}\,\frac{\pi\,(dpsa - ds)}{bw\,d^*} \tag{2}$$

mit

$$d^* = 2\,\delta\,(1 - \mathrm{e}^{-ds/2\,\delta}) \quad \text{und} \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\,f\,\mu\,\varkappa}}.$$

C 3: Selbst- und Gegeninduktivitäten

Die Induktivität

$$L_{\mu\nu} = \frac{\psi\ \mathrm{ha}_\mu}{\underline{I}\ \mathrm{wir}_\nu} = \frac{\underline{\Phi}\ \mathrm{ha}_{\mu\nu}}{\underline{I}\ \mathrm{wir}_\nu}, \tag{3}$$

$$\mu = 1 \ldots n, \quad \nu = 1 \ldots n, \quad 1' \ldots n',$$

stellt den auf einen Wirbelstrom $\underline{I}\ \mathrm{wir}_\nu$ bezogenen Fluß $\underline{\Phi}\ \mathrm{ha}_{\mu\nu}$ dar,

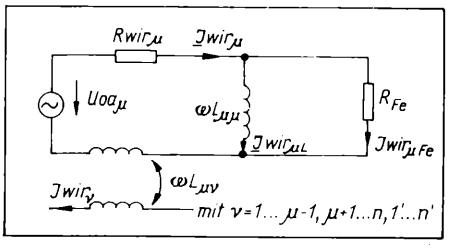


Bild 3. Ersatzschaltbild der μ-ten Wirbelstrombahn
$I\text{wir}_\mu$ Wirbelstrom der μ-ten Wirbelstrombahn; $R\text{wir}_\mu$ ohmscher Widerstand der μ-ten Wirbelstrombahn; $\underline{U}\text{oa}_\mu$ treibende Spannung, die vom Fluß $\underline{\Phi}$oa (d.h. vom Fluß $\underline{\Phi}$ in der PS ohne Preßstangenabschirmung) in der μ-ten Wirbelstrombahn induziert wird; $L_{\mu\mu}$ Selbstinduktivität der μ-ten Wirbelstrombahn; $\underline{I}\text{wir}_{\mu L}$ Magnetisierungsblindstrom der μ-ten Wirbelstrombahn; $\underline{I}\text{wir}_\nu$ Wirbelströme in den anderen Wirbelstrombahnen ($\nu = 1 \cdots u-1, \mu+1 \cdots n, 1' \cdots n'$); $L_{\mu\nu}$ Gegeninduktivität der ν-ten mit der μ-ten Bahn

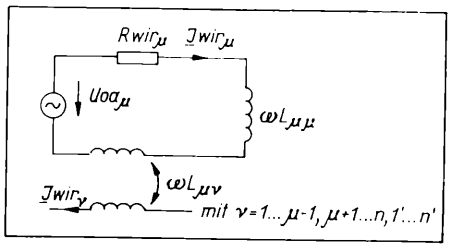


Bild 4
Vereinfachtes Ersatzschaltbild der μ-ten Wirbelstrombahn

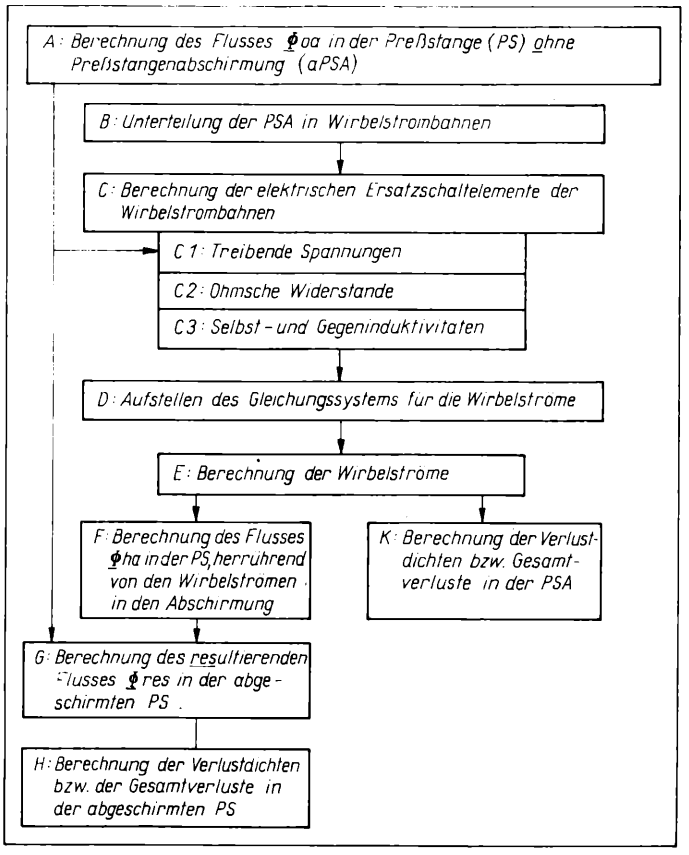
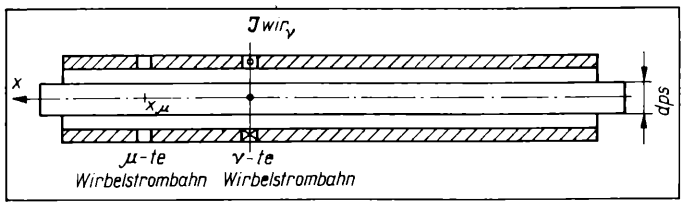


Bild 5. Berechnungsschritte zur Bestimmung der Verlustdichte elektrisch abgeschirmter Preßstangen und elektrischer Preßstangenabschirmungen

Bild 6. Zur Berechnung der Induktivitäten $L_{\mu\nu}$



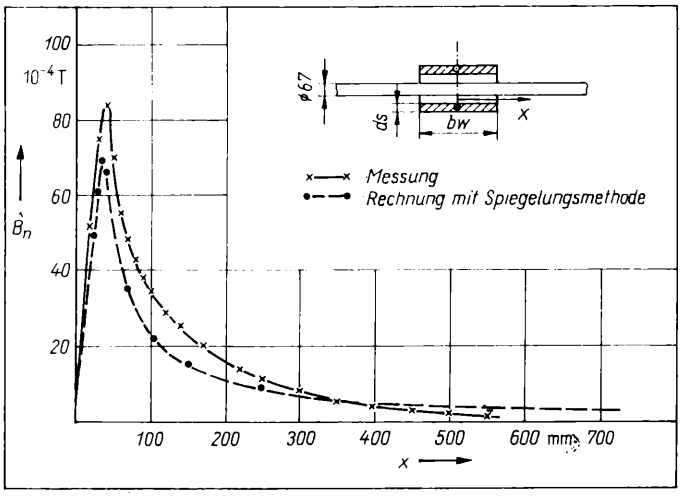


Bild 7. Normalkomponente $\hat{B}_n$ an der Oberfläche einer unendlich ausgedehnten Rundstange (St. 60), herrührend von einer darumliegenden Wirbelstrombahn (f = 50 Hz, bw = 70 mm, ds = 10 mm)

der von diesem Strom $\underline{I}$ wir$_\nu$ erzeugt wird und die von der μ-ten Wirbelstrombahn aufgespannte Fläche durchsetzt (Bild 6). Wird vorausgesetzt, daß im Luftgebiet zwischen *PS* und *PSA* die axiale Flußkomponente verschwindet, so ergibt sich der Fluß $\underline{\Phi}$ ha$_\mu$ aus der Normalkomponente der Induktion an der *PS*-Oberfläche $\underline{B}$ nha$_\nu$ (x), herrührend vom Wirbelstrom in der ν-ten Wirbelstrombahn der Abschirmung:

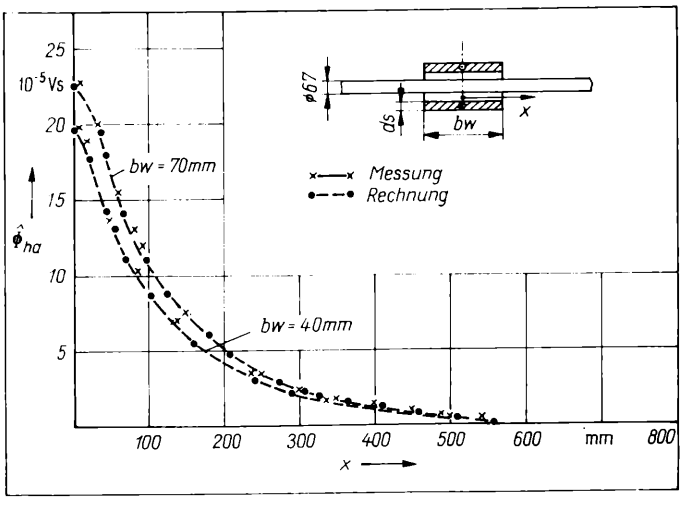
$$\underline{\Phi}\,\text{ha}_\mu = \pi\, dps \int_{x=\infty}^{x_\mu} \underline{B}\,\text{nha}_\nu(x)\, dx\,. \tag{4}$$

Zunächst soll untersucht werden, ob die Normalkomponente $\underline{B}$ nha mit der Spiegelungsmethode [5] und daraus der Fluß $\underline{\Phi}$ ha bestimmt werden kann. Dazu wurde das „Modell einer um eine *PS* liegenden Wirbelstrombahn" gefertigt (Bild 7). Dem gemessenen Induktionsverlauf an der *PS*-Oberfläche, herrührend von einer Wirbelstrombahn, ist der mit der Spiegelungsmethode errechnete Induktionsverlauf gegenübergestellt. Der Spiegelungskorrekturfaktor betrug kor = 1. Die Spiegelungsmethode dient zur Berechnung ebener elektromagnetischer Felder. Die Zylindersymmetrie der Preßstangenabschirmung berücksichtigt der Flächenkorrekturfaktor

$$k_F = \frac{\text{mittlerer Radius der Wirbelstrombahn}}{\text{Radius der Preßstange}}\,. \tag{5}$$

Messungen an Modellen mit bw = 40 mm, bw = 70 mm sowie bw = 520 mm bei Netz- und Modellfrequenz zeigten, daß die Normalkomponente B n an der *PS*-Oberfläche für $x > bw/2 + 565$ mm verschwindet (Bild 7). Aus dem Vergleich zwischen Meß- und Rechenwerten kann der Berechnungsalgorithmus für die Normalkomponente $\underline{B}$ nha (x) abgeleitet werden:

Bild 8. Fluß $\hat{\Phi}_{ha}$ in einer unendlich ausgedehnten Rundstange (St 60), herrührend von einer darumliegenden Wirbelstrombahn (f = 50 Hz, bw = 40 bzw. 70 mm, ds = 10 mm)



— Berechnung der maximalen Normalkomponente $\underline{B}$ nha ($x = bw/2$) nach der Spiegelungsmethode und anschließende Korrektur dieser Normalkomponente

$$\underbrace{\underline{B}\,\mathrm{nha}\,(bw/2)}_{\text{tatsächlich}} = \underbrace{\underline{B}\,\mathrm{nha}\,(bw/2)\,k_{\mathrm{F}}\,0{,}95}_{\text{berechnet nach der Spiegelungsmethode}}. \qquad (6)$$

Der Faktor 0,95 berücksichtigt den Einfluß der Wirbelströme im massiven Eisen.

— Berechnung des Verlaufs $\underline{B}$ nha (x), indem der gemessene Verlauf durch eine mathematische Funktion $\underline{B}$ nha $(x) = f$ [$\underline{B}$ nha ($x = bw/2$), x] approximiert und für die Berechnung zugrunde gelegt wird.

Der aus dem so errechneten $\underline{B}$nha (x)-Verlauf ermittelte Verlauf von $\underline{\Phi}$ha (x) stimmt sehr gut mit den Meßergebnissen am Wirbelstrombahnmodell überein (Bild 8).

D: Aufstellen des Gleichungssystems für die Wirbelströme
Bei der Berechnung der Wirbelströme werden sie in Real- und Imaginärteil zerlegt. Als Realteil wird die in Phase zum Fluß $\underline{\Phi}$oa liegende Wirbelstromkomponente definiert. Die n Maschengleichungen, die unter Beachtung des symmetrischen Flußverlaufs in der *PS* aufgestellt werden können, liefern das Gleichungssystem für die Wirbelströme in einer elektrischen Preßstangenabschirmung (Bild 9).

E: Berechnung der Wirbelströme
Die Lösung des Gleichungssystems (Bild 9) erfolgt mit dem Gaußschen Algorithmus; somit können die Real- und Imaginärteile der Wirbelströme $I\mathrm{wir}_\nu$ bestimmt werden.

F: Berechnung des Flusses $\underline{\Phi}$ha in der Preßstange herrührend von den Wirbelströmen in der Abschirmung
Sind die Wirbelströme bekannt, so können über die ermittelten Induktivitäten $L_{\mu\nu}$ die Flüsse $\underline{\Phi}\mathrm{ha}_{\mu\nu}$ bestimmt werden.

G: Berechnung des resultierenden Flusses $\underline{\Phi}$res in der abgeschirmten Preßstange
Eine phasenrichtige Addition des Flusses in der Preßstange ohne Abschirmung, herrührend von jedem Wirbelstrom, liefert den resultierenden Fluß

$$\underline{\Phi}\,\mathrm{res}_\mu = \underline{\Phi}\,\mathrm{oa}_\mu + \sum_{\nu=1}^{n} \underline{\Phi}\,\mathrm{ha}_\mu + \sum_{\nu=1}^{n''} \underline{\Phi}\,\mathrm{ha}_{\mu\nu}. \qquad (7)$$

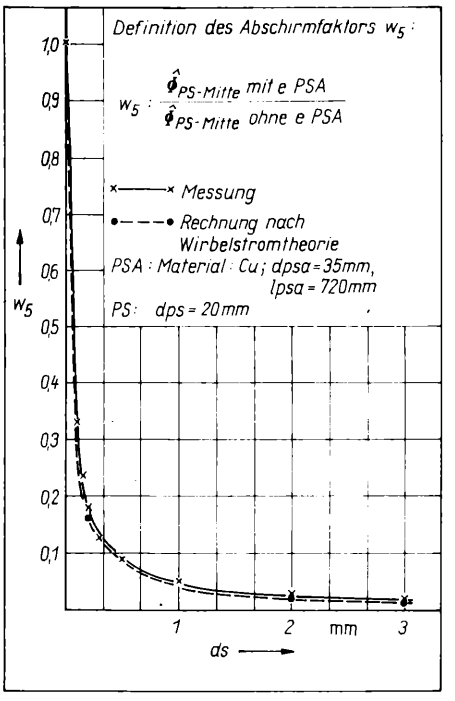
H: Berechnung der Verlustdichten bzw. der Gesamtverluste in der abgeschirmten Preßstange nach [4]

K: Berechnung der Verlustdichten bzw. der Gesamtverluste in der Preßstangenabschirmung nach [4]

2.2. Berechnung der Abschirmwirkung einer Preßstangenabschirmung im Querfeld

Nach [4] ist es möglich, die Normalkomponente der Induktion am Umfang einer ungeschirmten Preßstange zu berechnen. Da die Normalkomponente längs des Preßstangenumfangs sinusförmig verläuft, ist es zulässig, die *PSA* bei der Berechnung in zwei Halbschalen (Halbschale, die den Wicklungen zugewandt bzw. die der Wicklung abgewandt ist) zu zerlegen. Jede dieser Halbschalen wird als ebene, elektrisch gut leitende Abschirmung aufgefaßt. Die Wirbelströme und der in die Preßstange eindringende Fluß können dann nach [2] berechnet werden.

Bild 11
Modelltransformator. Abschirmungsfaktor W_5 von Preßstangenabschirmungen verschiedener Dicken



2.3. Berechnung der gegenseitigen Beeinflussung des Längs- und Querfeldes

Durch die Wirbelströme sind das Längs- und Querfeld miteinander verkoppelt. Die gegenseitige Beeinflussung kann durch einen iterativen Berechnungsgang berücksichtigt werden. Im 1. Iterationsschritt werden die Wirbelströme in der *PSA*, herrührend vom Längsfeld ohne *PSA*, nach Abschn. 2.1. berechnet. Sie haben ein resultierendes Querfeld zur Folge, das ebenfalls Wirbelströme in der *PSA* antreibt. Werden das ursprüngliche und das von letzteren Wirbelströmen erzeugte Längsfeld zu einem neuen Längsfeld überlagert, so kann der Berechnungszyklus von vorn beginnen. Eine solche Iteration wurde nicht durchgeführt, denn die folgende Nachrechnung des Flusses in der abgeschirmten Preßstange lieferte ohne Berücksichtigung des Querfeldes hinreichend genaue Ergebnisse.

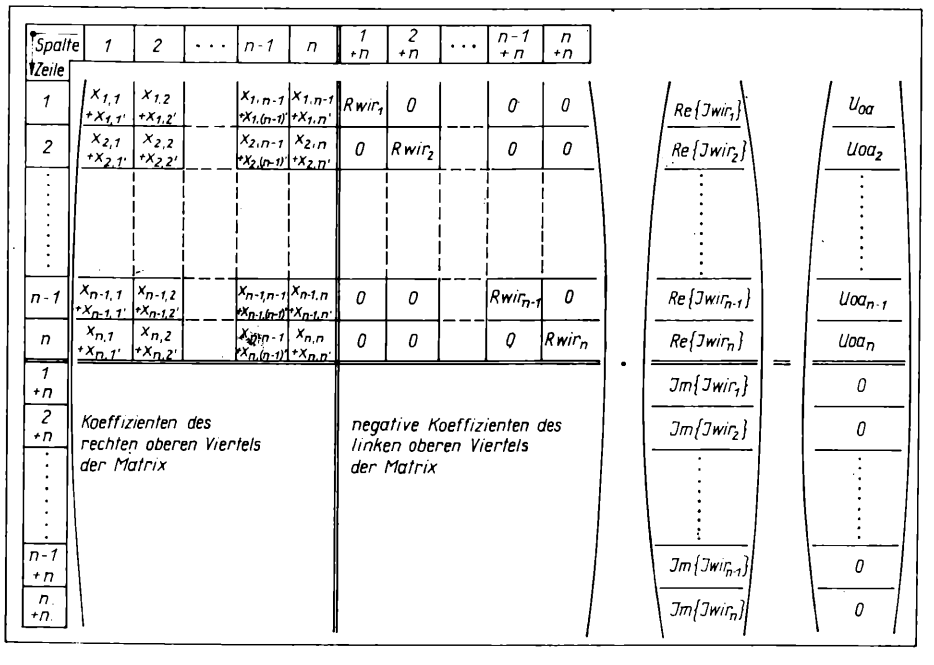
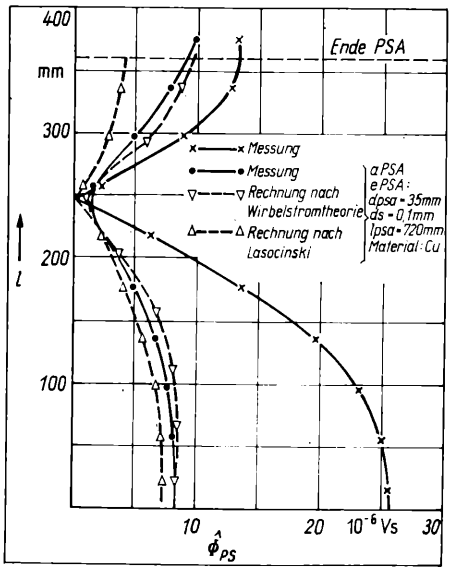


Bild 9. Matrix des linearen Gleichungssystems zur Berechnung der Wirbelströme in einer elektrischen Preßstangenabschirmung

Bild 10. Modelltransformator. Fluß in der PS (Dmr. 20 mm) mit und ohne Preßstangenabschirmung (zu × —— × Messung gehört oPSA)



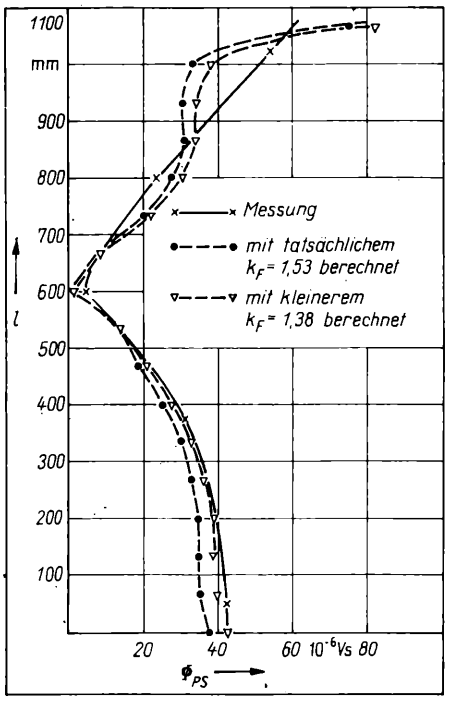


Bild 12
Fluß Φ_{PS} in einer elektrisch abgeschirmten Preßstange eines Drehstromtransformators

3. Nachrechnung eines Modelltransformators

Bild 10 zeigt einen Vergleich der Meß- mit den Rechenergebnissen sowohl nach der Theorie von *Lasocinski* [1] als auch nach der Wirbelstromtheorie. Der minimale Einfluß des Querfeldes ist aus den qualitativ gut übereinstimmenden Kurvenverläufen ersichtlich. Die Theorie nach *Lasocinski* liefert erwartungsgemäß am *PSA*-Ende zu kleine Resultate.
Der Abschirmungsfaktor

$$W_5 = \frac{\hat{\Phi}_{\text{PS-Mitte}} \text{ mit PSA}}{\hat{\Phi}_{\text{PS-Mitte}} \text{ ohne PSA}}, \tag{8}$$

gibt Auskunft über die Wirksamkeit einer *PSA* (Bild 11).

4. Nachrechnung eines Drehstromtransformators

An einer mit einem Aluminiumrohr elektromagnetisch abgeschirmten Preßstange wurde der Fluß meßtechnisch sowie analytisch nach der Wirbelstromtheorie bestimmt. Bild 12 zeigt den Flußverlauf in der abgeschirmten Preßstange. Der Fehler bei der Berechnung des Flusses in Preßstangenmitte unter Berücksichtigung des tatsächlichen Faktors k_F beträgt -10%. In das gleiche Bild ist der mit einem kleineren Faktor k_F berechnete Kurvenverlauf eingezeichnet. Durch die elektrische Preßstangenabschirmung wurde der maximale Fluß in Preßstangenmitte um den Faktor 19 reduziert.

5. Zusammenfassung

Der Fluß in Preßstangen wird durch eine elektromagnetische Preßstangenabschirmung wirkungsvoll gedämpft.
Es wird eine neue Berechnungsmethode zur Bestimmung der Verluste der Preßstange sowie deren Abschirmung vorgestellt und die Anwendung durch Vergleich mit Meßergebnissen bestätigt.

Literatur

[1] *Lasocinski, J.:* Die Abschirmung der vertikalen Zugspindeln des Transformators. Vortrag auf der wissenschaftlich-technischen Konferenz des RGW, Togliatti 1972
[2] *Kubusch, M.:* Berechnung der Verlustdichteverteilungen ebener Abschirmungen und abgeschirmter Eisenteile von Transformatoren. ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 8, S. 300–304
[3] *Kubusch, M.:* Berechnung der Zusatzverluste und der Temperaturfelder ferromagnetischer Konstruktionsteile von Transformatoren. ELEKTRIE, Berlin 32 (1978) 6, S. 334–335
[4] *Kubusch, M.:* Berechnung der Zusatzverluste und der Temperaturfelder inaktiver Konstruktionsteile von Großtransformatoren. Dissertation. TU Dresden, 1979
[5] *Roseburg, D.:* Maschinelle Berechnung der magnetischen Feldkomponenten im Wickelraum von Transformatoren. ELEKTRIE, Berlin 27 (1973) 1, S. 20–22

EA 6017

Tendenzen in der mathematischen Behandlung nichtstationärer Betriebszustände von Synchronmaschinen

E. Bunzel, KDT, Dresden; B. Oswald, KDT, Leipzig

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* zum 65. Geburtstag

Die allgemein zur Verfügung stehende Rechentechnik ermöglicht die Simulation des Betriebsverhaltens von elektrischen Maschinen ohne wesentliche Einschränkungen und mit erweiterten mathematischen Modellen. Ein wesentlicher neuer Aspekt der Computersimulation ist dabei, daß Modellumfang und -struktur zumindest bei der Simulation des Betriebsverhaltens weniger Maschinen nahezu keinen Einschränkungen unterliegen und die Modelle entsprechend den Erfordernissen ständig weiterentwickelt werden.
Bei der Programmentwicklung für die Simulation des nichtstationären Betriebsverhaltens von Synchronmaschinen geht man deshalb auch nicht so vor, etwa die bekannten klassischen, auf für leichte Auswertung zugeschnittene Algorithmen umzusetzen. Sie würden ohnehin auch zu unvollständigen Aussagen führen. Heutige Computerprogramme beruhen auf der Lösung eines nichtlinearen Algebro-Differentialgleichungssystems, das strukturmäßig zwar dem ursprünglichen Parkschen Modell mit einer Ersatzdämpferwicklung in jeder Achse noch entspricht, aber bereits solche für die Simulation des Betriebsverhaltens wesentlichen Erscheinungen wie die Sättigung, Strom- und Feldverdrängung enthält und dem ein genauerer Verkettungsmechanismus zugrunde liegt. Die dominierende Modellform ist die Zustandsdarstellung. Sie ermöglicht auch, a priori Informationen über das dynamische Verhalten an Hand der Eigenwerte der linearisierten Systemmatrix zu erhalten und schafft damit die Voraussetzung, für bestimmte Vorgänge optimal angepaßte Modelle systematisch zu entwickeln.
Erfolgversprechende Tendenzen bei der Entwicklung angepaßter Modelle minimaler Ordnung resultieren aus der Anwendung der „singular perturbation method". Die korrekte Anwendung dieser Methode führt zu einer neuen Klassifizierung der Simulations-Modelle. Sie soll in diesem Artikel zur Diskussion gestellt werden.
Mit dem verbesserten Parkschen Modell können die meisten Simulationsaufgaben befriedigend gelöst werden. Es sind aber auch seine Grenzen, insbesondere hinsichtlich seiner Treffsicherheit bei der Beschreibung des subtransienten Verhaltens von Synchronmaschinen mit massiven Elementen im magnetischen Kreis bekannt geworden. Den offensichtlichen Diskrepanzen zwischen Rechnung und Messung kann begegnet werden, indem Modelle mit mehreren Ersatzdämpferwicklungen in jeder Achse verwendet werden. Die Tendenz zum Übergang auf derartige Modelle ist zweifellos vorhanden und kennzeichnet den gegenwärtigen Stand der Theorie. Nicht zu übersehen ist jedoch der wesentlich höhere Aufwand für die Parameteridentifikation. Neben verbesserten Algorithmen zur Parameterberechnung ist die Anwendung einer schnellen und genauen digitalen Meßwerterfassung und -auswertung eine wesentliche Voraussetzung für die Weiterentwicklung und Nutzung von allgemeinen mathematischen Modellen mit einer hohen Abbildungstreue.

1. Mathematische Modelle auf der Basis des klassischen Parkschen Maschinenmodells

Die mathematische Behandlung allgemeiner Betriebszustände von Synchronmaschinen erfolgt im europäischen Raum seit *Laible* [1] vorzugsweise auf der Basis der Zweiachsentheorie nach *Park* [2]. Ohne einen Analog- oder Digitalrechner war die Lösung des Parkschen Modells zunächst nur durch Anwendung von Näherungen möglich [1] [3]. Das klassische Parksche Maschinenmodell wird

Dr sc. techn. *Eckehard Bunzel* ist wissenschaftlicher Oberassistent an der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden; Doz. Dr. sc. techn. *Bernd Oswald* ist Dozent an der Sektion Elektroenergieanlagen der TH Leipzig.

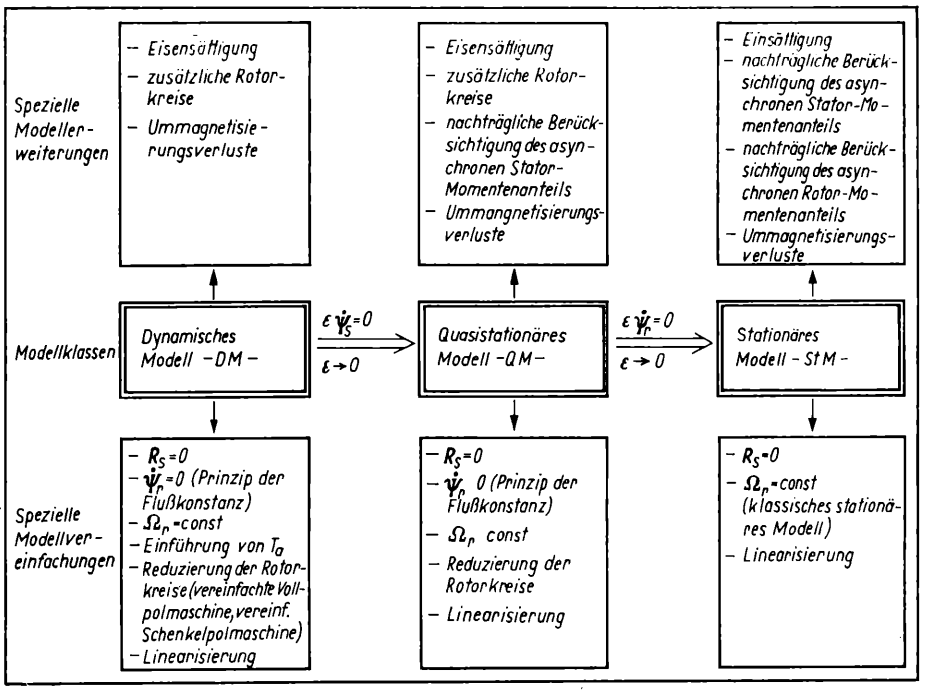


Bild 1. Modellklassen, spezielle Modellvereinfachungen und -erweiterungen

durch ein Algebro-Differentialgleichungssystem mit konstanten Parametern beschrieben:

$$\begin{bmatrix} \underline{u}_s \\ \cdots \\ \underline{u}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_s & \boldsymbol{0} \\ \cdots & \cdots \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{R}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_s \\ \cdots \\ \underline{i}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\underline{\psi}}_s \\ \cdots \\ \dot{\underline{\psi}}_r \end{bmatrix} + p_z \begin{bmatrix} \underline{\Omega}_r & \boldsymbol{0} \\ \cdots & \cdots \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\psi}_s \\ \cdots \\ \underline{\psi}_r \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{\psi}_s \\ \cdots \\ \underline{\psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_s & \boldsymbol{L}_{sr} \\ \cdots & \cdots \\ \frac{3}{2}\boldsymbol{L}_{sr} & \boldsymbol{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_s \\ \cdots \\ \underline{i}_r \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{g}_s = \{g_d\ g_q\ g_0\}^T$$

$$\boldsymbol{g}_r = \{g_f\ g_D\ g_Q\}^T$$

$$\underbrace{p_z \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d)}_{m_e} + m_A = J \dot{\Omega}_r = \frac{1}{p_z} J \ddot{\vartheta}. \qquad (1)$$

Die Invarianz der Parameter schließt die Berücksichtigung derartiger physikalischer Effekte wie Feld- und Stromverdrängung sowie magnetische Sättigung aus. Die Wirkung der elektrischen Rotorkreise wird durch jeweils eine Ersatzdämpferwicklung in der d- und q-Achse mit konstanten, frequenzunabhängigen Parametern beschrieben. Den Flußverkettungs- und Parameterbestimmungsgleichungen liegt für alle Rotor- und Statorkreise generell die Grundwellentheorie zugrunde.

Die Überführung des Gleichungssystems (1) in die zur Computersimulation vorteilhaften Zustandsdifferentialgleichung (ZDGL) erfolgt bei Wahl der Flußverkettungen als Zustandsvariable durch Inversion der Flußverkettungsgleichung

$$\begin{bmatrix} \underline{i}_s \\ \underline{i}_r \end{bmatrix} = \boldsymbol{L}^{-1} \begin{bmatrix} \underline{\psi}_s \\ \underline{\psi}_r \end{bmatrix}$$

und Einsetzen in die Spannungsgleichung mit dem Ergebnis

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{\psi}}_s \\ \dot{\underline{\psi}}_r \end{bmatrix} = -(\boldsymbol{R}\boldsymbol{L}^{-1} + p_z \underline{\Omega}) \begin{bmatrix} \underline{\psi}_s \\ \underline{\psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{u}_s \\ \underline{u}_r \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

$(\boldsymbol{R} = \mathrm{diag}\,\{\boldsymbol{R}_s\ \boldsymbol{R}_r\}, \quad \underline{\Omega} = \mathrm{diag}\,\{\underline{\Omega}_r = \boldsymbol{0}\})$.

Die Rotorbewegung wird durch die Zustandsgrößen Ω_r und $\vartheta = p_z \int \Omega_r\, dt$ beschrieben.

Die Anwendung der „singular perturbation method" [4] [5] bei der systematischen Reduzierung auf die in Netzkoordinaten transformierte ZDGL (2) führt zu drei prinzipiellen Modellklassen, die sinnvoll als dynamisches (DM), quasistationäres (QM) und stationäres Modell (StM) bezeichnet werden.

Das dynamische Modell ist dadurch gekennzeichnet, daß es sowohl Ausgleichsvorgänge in den Stator- und Rotorwicklungen als auch für den Wellenstrang beschreibt. Es ist die vollständige ZDGL (2) für das klassische Parksche Modell (1) und enthält die Zustandsgrößen der Stator- und Rotorkreise sowie des Wellenstranges.

Im Gegensatz dazu enthält das stationäre Modell nur noch Zustandsgrößen für die mechanische Rotorbewegung. Folglich berücksichtigt es keinerlei Ausgleichsvorgänge in den Stator- und Rotorwicklungen. Die Bezeichnung „stationär" wurde gewählt, weil für jede durch die Bewegungsgleichung gegebene Drehzahl stationäre drehzahlabhängige elektromagnetische Verhältnisse vorliegen. Das setzt voraus, daß die zugelassenen Drehzahländerungen keine Ausgleichsvorgänge in den Wicklungen hervorrufen. Anstelle der Stator- und Rotor-Zustandsgleichungen treten allgebraische Gleichungen zur Beschreibung des eingeschwungenen elektromagnetischen Zustandes. Der vollständige, auch hinsichtlich der Rotorbewegung eingeschwungene Zustand ist ein Sonderfall des stationären Modells.

Zwischen beiden Extremen liegt das quasistationäre Modell mit Zustandsgrößen für die elektrischen Rotorkreise und den Wellenstrang. Er berücksichtigt die elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge nur in den Rotorwicklungen. Da sie generell langsam im Vergleich zur Netzfrequenz verlaufen, wurde die Bezeichnung „quasistationär" gewählt. In der klassischen Literatur wird die Bezeichnung „quasistationär" auf die Drehzahländerungen der hier definierten stationären Modellvorstellung angewendet, während die an dieser Stelle eingeführte quasistationäre Modellklasse bisher nicht expliziert definiert war. Eine Simulation auf der Grundlage dieses Modells erfordert wie beim DM i. allg. die Nutzung eines Computers.

Die Herleitung des quasistationären und des stationären Modells aus dem dynamischen Modell entspricht einer Modellreduzierung hinsichtlich der Ordnung des ZDGL-Systems. Sie kann mit Hilfe der „singular perturbation method" systematisch und begründet unmittelbar im Zeitbereich durch die Grenzübergänge $\varepsilon \to 0$ (Bild 1) vorgenommen werden [4] [5]. Der Übergang vom dynamischen zum hier genauer definierten quasistationären Modell wird in der klassischen Literatur durch Vernachlässigung (Nullsetzen) der sog. transformatorischen Spannungsglieder ($\dot{\underline{\psi}}_s$) vollzogen, was im Widerspruch zu den im quasistationären (und stationären) Modell durchaus zu berücksichtigenden (langsamen) zeitlichen Änderungen der Mittelwerte der Ständerflußverkettungen steht. Es ist nämlich zu beachten, daß die Vernachlässigung der transformatorischen Anteile $\dot{\underline{\psi}}_s$ auf Grund ihrer Schnelligkeit und nicht auf Grund ihrer Kleinheit gerechtfertigt ist.

2. Güte konventioneller Näherungslösungen des klassischen Parkschen Maschinenmodells

Tafel 1 enthält eine Zusammenstellung der mit klassischen Methoden berechenbaren relevanten nichtstationären Betriebszustände, der erforderlichen Näherungen einschließlich der Bedeutung dieser Lösungen und ihrer Abbildungsschärfe. Die Lösung des klassischen Parkschen Modells mit den angegebenen Näherungen liefert zum Teil Ergebnisse, die infolge ihrer Übereinstimmung mit dem Experiment die Gültigkeit des Modells bestätigen (natürlich auch die Richtigkeit des klassischen ingenieurmäßigen Herangehens bei der Lösung komplizierter mathematischer Probleme). Das markanteste Beispiel ist die Berechnung der Strangströme [$i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ aus

Tafel 1. Mit klassischen Methoden berechenbare nichtstationäre Betriebszustände und Vorgänge

Betriebszustand/Vorgang	Modell	spezielle Modellvereinfachung	Anwendung/Bedeutung	Abbildungsschärfe/Bemerkung
3-poliger Stoßkurzschluß (aus dem Leerlauf)	DM	– Ω_r = const – Einführung von T_a	Parameteridentifikation; Beanspruchung der Maschine im Fehlerfall	$i_s(t)$ gut $m_e(t)$ unzureichend (asynchroner Rotor-Momentenanteil fehlt)
Unsymmetrische Stoßkurzschlüsse (aus dem Leerlauf)	DM	– Ω_r = const – $R_s = 0$ – $\dot{\underline{\psi}}_r = 0$	Beanspruchung der Maschine im Fehlerfall	$i_s(t)$ – Anfangsverlauf (ohne Abklingen) $m_e(t)$ – unzureichend
Asynchroner Hochlauf	StM	– $R_s = 0$	wichtiger Betriebszustand für Synchronmotoren	– Berechnung des statischen asynchronen Moments ungenau bei halber synchroner Drehzahl (Görges-Phänomen unberücksichtigt) und in der Nähe des Synchronismus (Sättigung unberücksichtigt) – überschlägliche Berechnung des Hochlaufvorgangs und der pulsierenden Momentenanteile – unvollständige Abbildung des Einschaltvorganges – Intrittfallvorgang nicht berechenbar
Laständerungen bei Betrieb an einem starren Netz in der Nähe des Synchronismus	QM s	– $R_s = 0$ – $\dot{\underline{\psi}}_r = 0$ – Reduzierung der Rotorkreise	transiente Stabilität bei plötzlichen Laständerungen	– Stabilitätsaussagen nur innerhalb der transienten Phase möglich
Erzwungene Pendelungen, Schwingungsverhalten und Regelvorgänge	DM QM StM	– Linearisierung (kleine Änderungen) – ($R_s = 0$) – Einführung von T_a	Kleinsignalverhalten: • Untersuchung von Regelvorgängen • Schwingungsverhalten bei periodischen Störungen	– Beschränkung auf Kleinsignalverhalten

$i_s(t)$] nach plötzlichem dreipoligem Kurzschluß aus dem Leerlauf heraus. Das kann jedoch nicht verwundern, hat doch der dreipolige Stoßkurzschlußversuch die Entwicklung des klassischen Synchronmaschinenmodells maßgeblich beeinflußt. Der dreipolige Stoßkurzschluß ist damit auch für die Parameteridentifikation der Synchronmaschine geeignet.

Es gibt jedoch auch eine Anzahl von im Experiment oder während des Betriebes registrierten Erscheinungen, die durch eine manuelle Lösung (Anwendung von Näherungen) des Modells nicht berechenbar sind. Die Nutzung der modernen Rechentechnik weist nach, daß einige dieser Nichtübereinstimmungen nicht auf eine ungenügende Abbildungsschärfe des klassischen Parkschen Modells, sondern auf die Näherungen zurückzuführen sind. Klassische Beispiele sind das „Hängenbleiben" einer Drehstrommaschine während des asynchronen Hochlaufs bei etwa halber synchroner Drehzahl und die unerwartet hohe Momenten- bzw. Torsionsbeanspruchung der Synchronmaschine und des Wellenstranges bei Stoßkurzschluß.

Einige dieser Phänomene wurden bereits von Pionieren der Elektrotechnik physikalisch richtig interpretiert, ihre quantitative Erfassung war jedoch nur sehr grob möglich. Beispielgebend ist das bereits erwähnte „Hängenbleiben" während des asynchronen Hochlaufs. *Görges* analysierte das später nach ihm benannte Phänomen und erkannte in der Anisotropie des Rotors und im ohmschen Widerstand der Ankerstränge (einschließlich des ohmschen Innenwiderstandes des Netzes) die Ursache [6]. Da R_s bei Berechnung des asynchronen Moments jedoch vernachlässigt werden mußte (Tafel 1), konnte dieses Phänomen mit der genäherten Lösung nicht abgebildet werden.

Ein anderes Beispiel liefert die Untersuchung der transienten Stabilität mit dem hier definierten quasistationären Modell. Die Bilder 2 und 3 vergleichen die mit dem QM berechneten Verläufe des Polradwinkels, Schlupfes und Drehmomentes bei dreipoligem Kurzschluß mit anschließender Kurzschlußaufhebung nach 100 ms für eine 3,15-MW-Synchronmaschine mit der Lösung für das DM so-

Bild 2. Kurzschluß und Kurzschlußaufhebung bei einem 3,15-MW-Synchronmotor
a) mit dem DM berechnet; b) mit dem QM berechnet
m_e Luftspaltdrehmoment; δ Polradwinkel; s Schlupf
Maßstäbe
m_e : 1 Skt ≙ 2, δ : 1 Skt ≙ 0,4 rad, s : 1 Skt ≙ 1 %

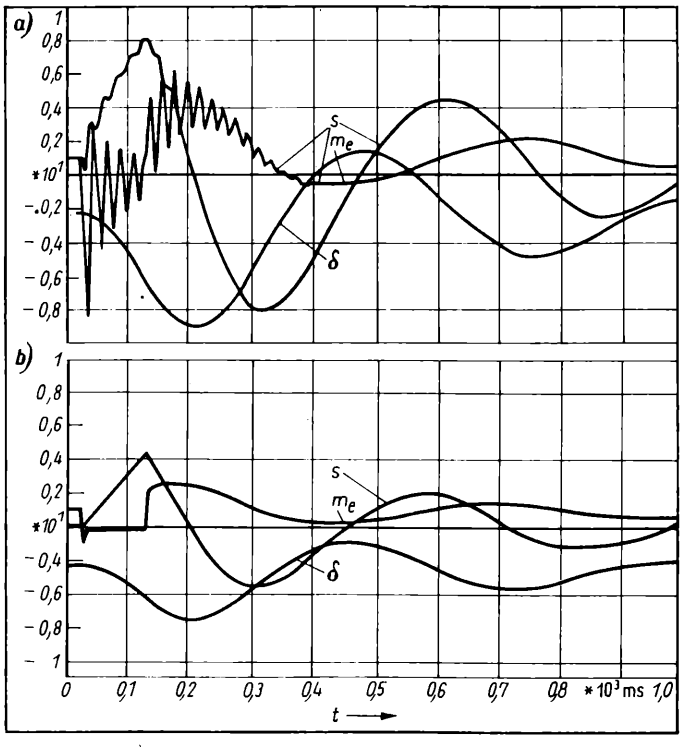
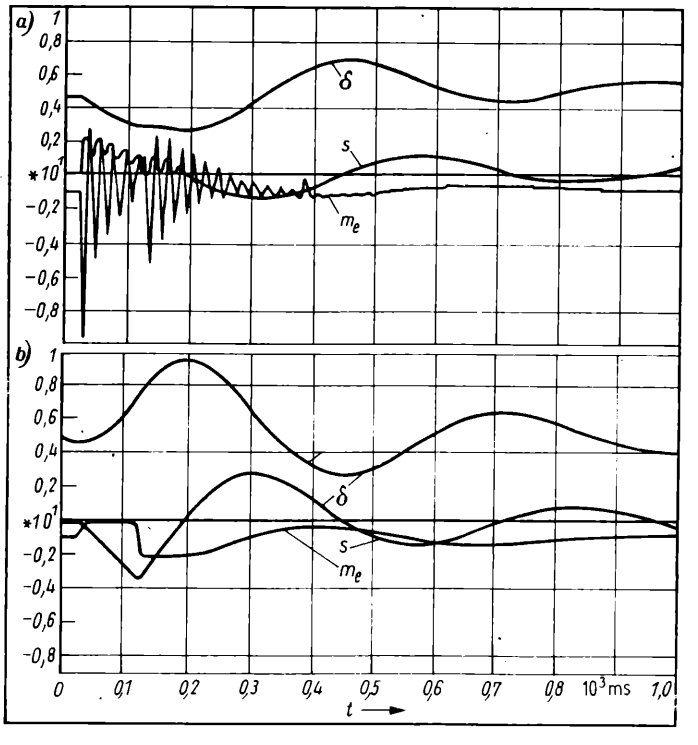


Bild 3. wie Bild 1, jedoch ausgehend vom Generatorbetrieb
Maßstäbe
m_e : 1 Skt ≙ 2, δ : 1 Skt ≙ 0,2 rad, s : 1 Skt ≙ 1 %



wohl ausgehend vom Motorbetrieb (Bild 2) als auch vom Generatorbetrieb (Bild 3). Es ist ersichtlich, daß durch die Vernachlässigung des asynchronen Statordrehmomentenanteils ausgehend vom Motorbetrieb ein zu stabiles Verhalten mit dem QM erzielt, während ausgehend vom Generatorbetrieb eine zu große Polradwinkelauslenkung berechnet wird. Dieser Mangel der QM macht sich allerdings nicht immer in so starkem Maße wie im gewählten Beispiel bemerkbar. Eine Alternative, den bei Nutzung der QM auftretenden Fehler zu reduzieren, erfordert die spezielle Modellerweiterung „Nachträgliche Berücksichtigung des asynchronen Statormomentenanteils" nach Bild 1. Die Gefahr einer falschen Aussage besteht auch bei der näherungsweisen Berechnung des bei Stoßkurzschluß auftretenden Drehmoments [7]. Mit den üblichen Näherungen zur Berechnung der Strangströme bei dreipoligem Stoßkurzschluß (s. Tafel 1), insbesondere den bei der Rücktransformation aus dem Laplace-Bereich praktizierten ($\omega T_v \gg 1$, $r_s \ll 1$), erhält man für das Drehmoment

$$m_e(t) = -\frac{2}{3} p_z \frac{\hat{u}_s^2}{\omega} \left\{ \left[\left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_d''} \right) \exp(-2t/T_a) \sin(\omega t) \cos(\omega t) \right] + \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \exp(-t/T_d') + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \exp(-t/T_d'') \right] \sin(\omega t) \right\}. \quad (3)$$

In dieser Gleichung wird das asynchrone Bremsmoment des fest mit dem Rotor verbundenen Luftspaltfeldes völlig vernachlässigt (asynchroner Rotormomentenanteil)[1]). Sie berücksichtigt lediglich die elektrische Dämpfung und den Einfluß der Läuferanisotropie. Weitere Vereinfachungen führen zu:

$T_v \to \infty$:

$$m_e(t) = -\frac{3}{2} p_z \frac{\hat{u}_s^2}{\omega} \left[\left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_d''} \right) \sin(\omega t) \cos(\omega t) + \frac{1}{X_d''} \sin(\omega t) \right] \quad (4)$$

$T_v \to \infty$, $X_d'' = X_q''$:

$$m_e(t) = -\frac{3}{2} p_z \frac{\hat{u}_s^2}{\omega} \frac{1}{X_d''} \sin(\omega t). \quad (5)$$

Für den zweisträngigen Kurzschluß erhält man analog:

$T_v \to \infty$:

$$m_e(t) = -\frac{3}{2} p_z \frac{\hat{u}_s^2}{\omega} \frac{[1 - \cos(\omega t)] \sin(\omega t) \cdot 4}{[(X_d'' + X_q'') + (X_d'' - X_q'') \cos(2\omega t)]^2} \times [X_q'' + (X_d'' - X_q'') \cos(\omega t)]. \quad (6)$$

$T_v \to \infty$, $X_d'' = X_q''$:

$$m_e(t) = -\frac{3}{2} p_z \frac{\hat{u}_s^2}{\omega} \frac{[1 - \cos(\omega t)] \sin(\omega t)}{X_d''}. \quad (7)$$

Die im Bild 4 dargestellten Verläufe zeigen den Einfluß der Kurzschlußart und der Vorbelastung auf das Stoßkurzschlußdrehmoment und die geringe Treffsicherheit der Näherungslösungen. Bei großen Turbogeneratoren ist der Anteil des asynchronen Drehmoments geringer und das wesentlich langsamer abklingende pulsierende Drehmoment stärker ausgeprägt.

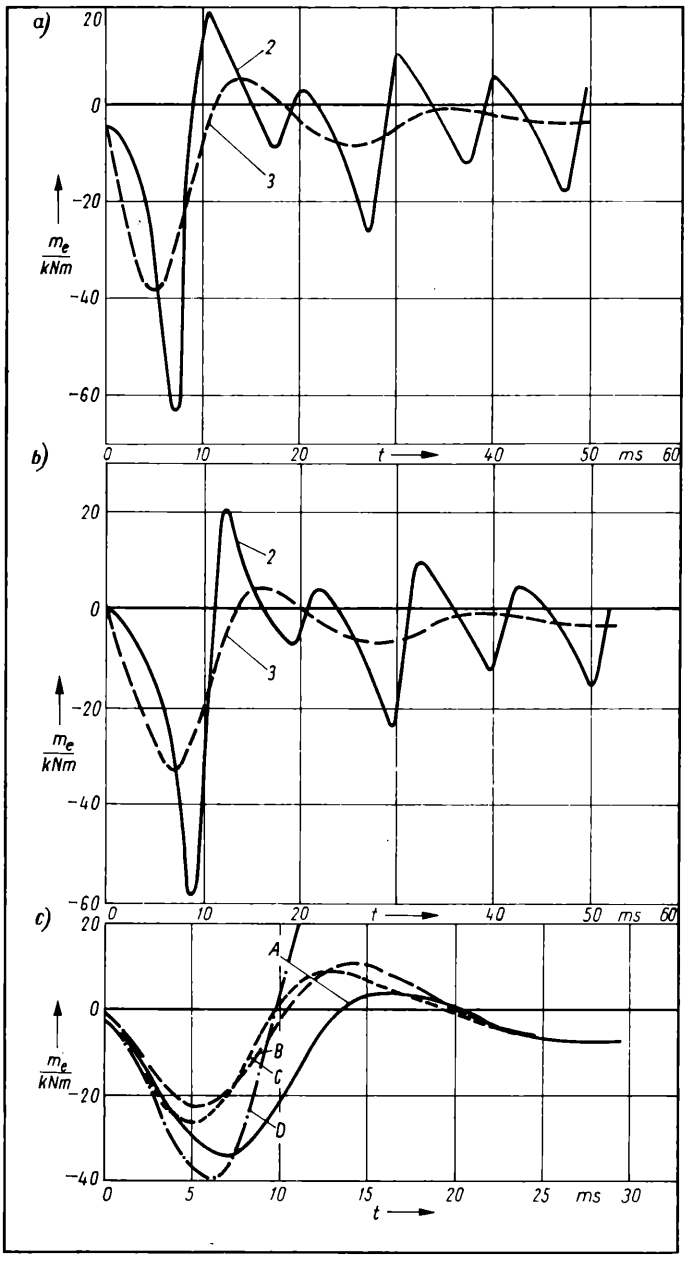


Bild 4. Stoßkurzschlußdrehmoment eines 600-kVA-Generators
(U_n = 390 V, I_n = 888 A, cos φ_n = 0,8, n_n = 1000 U/min, M_n = 4,8 kNm)
a) 2- und 3-strängiger Stoßkurzschluß aus dem Nennbetrieb
b) 2- und 3-strängiger Stoßkurzschluß aus dem Leerlauf
c) 3-strängiger Stoßkurzschluß aus dem Leerlauf — Vergleich der Berechnungsverfahren
(A) Simulationsprogramm auf der Basis des DM; (B) $m_e(A) - (P_{dw}/\Omega_r)$ (P_{dw} Stromwärmeverluste im Kurzschlußkreis); (C) Näherungslösung nach (3); (D) Näherungslösung nach (4)

3. Modellerweiterung

Von den im Bild 1 dargestellten Modellvereinfachungen ist — auch im Hinblick auf die weitere Entwicklung der Computertechnik — der gezielte Einsatz der ganannten 3 Modellklassen sehr sinnvoll, da sie einen akzeptablen Kompromiß zwischen Aufwand und Genauigkeit für bestimmte Aufgabenstellungen gewährleisten. Es ist aber nicht mehr vertretbar, die für das Erreichen von geschlossenen, einfachen Näherungsbeziehungen unbedingt erforderlichen speziellen Modellvereinfachungen nach Bild 1 im vollen Umfang aufrecht zu erhalten.

Im Gegenteil, es muß unter dem Aspekt des Computereinsatzes eine Vervollkommnung der einzelnen Modelle zur Berücksichtigung spezieller Einflußgrößen gezielt vorgenommen werden, wie am Beispiel der transienten Stabilität für das QM bereits erwähnt. Schon die mathematisch exakte Modellierung der Synchronmaschine auf der Basis des klassischen Parkschen Modells mit 1 + 2 Rotorkreisen liefert bei Einbeziehung der „tatsächlichen" Verkettungsverhältnisse in die Parameterberechnung, Berücksichtigung der Anisotropie, aller ohmschen Widerstände und der Hauptwegsättigung in vielerlei Hinsicht bessere Ergebnisse (z.B. für den Erregerstromverlauf und das Moment bei plötzlichem Kurzschluß oder den asynchronen Hochlauf). Der „tatsächliche" Verkettungsmechanismus zeichnet sich gegenüber der klassischen Grundwellenverkettung dadurch aus, daß die Berechnung der Flußverkettungen der symmetrisch zu den Hauptachsen des Rotorkoordinatensystems liegenden Dämpfermaschen (und damit auch der Ersatzdämpferwicklungen) sowie der Erregerwicklung oder der Magnetanordnung (bei Synchronmaschinen mit Dauermagneterregung) unter Zugrundelegung der tatsächlichen Feldkurve erfolgt. Die Rotorwicklungen und die Magnetanordnung (bei Synchronmaschinen mit Dauermagneterregung) tragen mit ihrer tatsächlichen Felderregerkurve am Feldaufbau bei [8] [9]. Diese Erweiterung des Modells führt neben der Wirkung spezieller Streufelder auf die durch *Canay* [10] bekanntgewordene gemeinsame „Streuinduktivität" von Erregerwicklung und Dämpferkäfig. Die Beachtung dieser Induktivität führt insbesondere zu einer größeren Abbildungsschärfe des Modells für die elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge im Erregerkreis.

[1]) In [7] findet dieser Momentenanteil bei der Erläuterung der Ursachen für die Unterschiede zwischen Messung und Rechnung ebenfalls keine Beachtung.

Modellgleichungen mit auf die Statorseite bezogenen Rotorgrößen und Parametern bieten die beste Möglichkeit, die Sättigung des magnetischen Hauptweges zu berücksichtigen. Die Hauptwegsättigung findet Eingang in die Hauptinduktivitäten L_{hd} und L_{hq} [8] [9]. In Synchronmaschinen mit ausgeprägten Polen verursacht die Sättigung eine zusätzliche gegenseitige Achsenbeeinflussung, die immer zu einer Schwächung des Längsachsenhauptflusses führt. Bei Synchronmaschinen in Vollpolausführung kann man voraussetzen, daß für die Sättigungsabhängigkeit von L_{hd} und L_{hq} nur eine magnetische Charakteristik maßgebend ist und der Sättigungszustand allein vom Hauptfluß $\hat{\Phi}_h$ bestimmt wird. Benutzt man die Leerlaufkennlinie, berechnen sich L_{hd} und L_{hq} aus:

$$L_{hd} = L_{hd\infty}\frac{i_f^+}{i_f}; \quad L_{hq} = L_{hq\infty}\frac{i_f^+}{i_f}$$

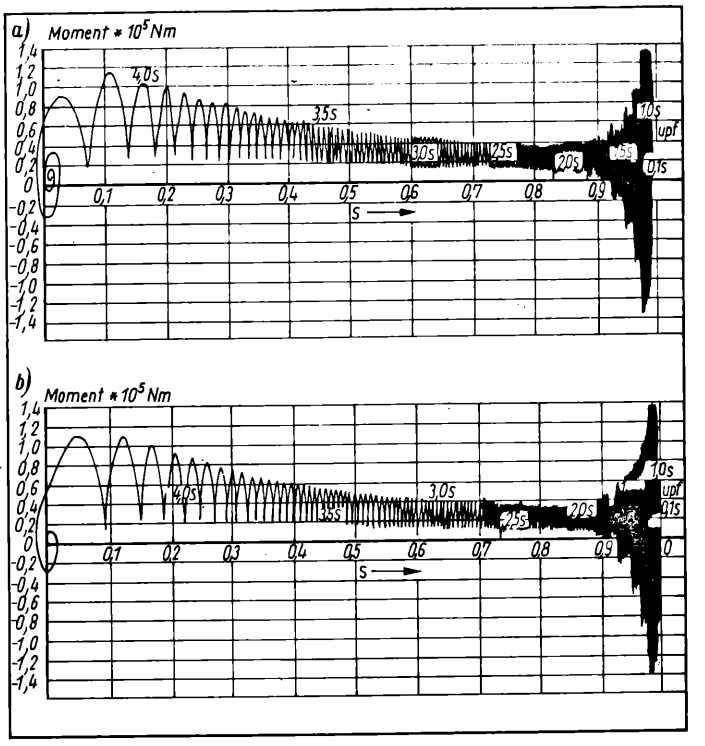
für

$$U_1 = \frac{2}{\pi}\omega\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}(w_s\,\xi_{s1})\,\hat{\Phi}_h.$$

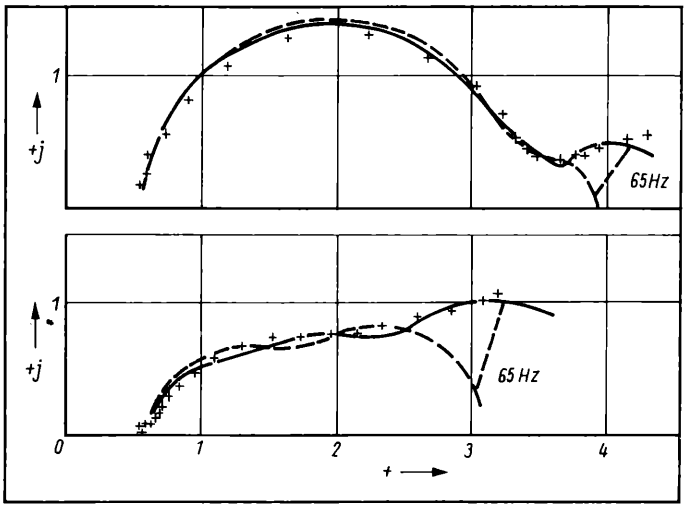
i_f^+ Erregerstrom aus der Luftspaltgeraden,
i_f Erregerstrom aus der Leerlaufkennlinie.

Die Berechnung der sättigungsabhängigen Parameter erfolgt bei der digitalen Simulation mit den Anfangswerten der Flußverkettungen und Ströme vor jedem Zeitschritt innerhalb der numerischen Integration der ZDGL. Im Bild 5 ist der mit und ohne Hauptwegsättigung berechnete asynchrone Hochlauf einer 10-MVA-Synchronmaschine dargestellt. Es wird deutlich, daß insbesondere der Vorgang des Intrittfallens vom Sättigungszustand des magnetischen Kreises abhängig ist.

Insbesondere für Synchronmaschinen mit massiv ausgeführten Polen oder in Vollpolausführungen hat das Maschinenmodell mit 1 + 2 Rotorkreisen nicht die erforderliche Abbildungstreue (z.B. zur Simulation des asynchronen Hochlaufs, des Stromrichterbetriebs, zur Berechnung der Stabilität und des Kurzschlußdrehmoments) [11] [12] [13]. In Folge wurden allgemeingültige Maschinenmodelle mit 2 + 2 und 3 + 3 Rotorkreisen entwickelt und genutzt. Physikalisch sind diese Modellerweiterungen vor allem durch die Wirkung massiver Eisenteile (natürliches Dämpfersystem), die tatsächliche Wirkung des Dämpferkäfigs und die Stromverdrängung zu erklären. Die Modellerweiterung führt zu den sog. sub-subtransienten Parametern und zu ausreichend genauen Ortskurven ($1/L_d$ (j s ω)) und ($1/L_q$ (j s ω)) besonders im Bereich großer Schlupfwerte (Bild 6). Die Ermittlung der sub-subtransienten Parameter ist jedoch nicht im Stoßkurzschlußversuch möglich, da die entsprechenden Zeitkonstanten im Bereich von Millisekunden liegen. Die Bestimmung der Modellparameter kann rechnerisch oder durch Messung der Frequenzgänge der Admittanzoperatoren erfolgen (Bild 7). Auf der Basis der elektrischen Netzwerke des Maschinenmodells kann das erweiterte ZDGL-System aufbereitet und bei



5



6

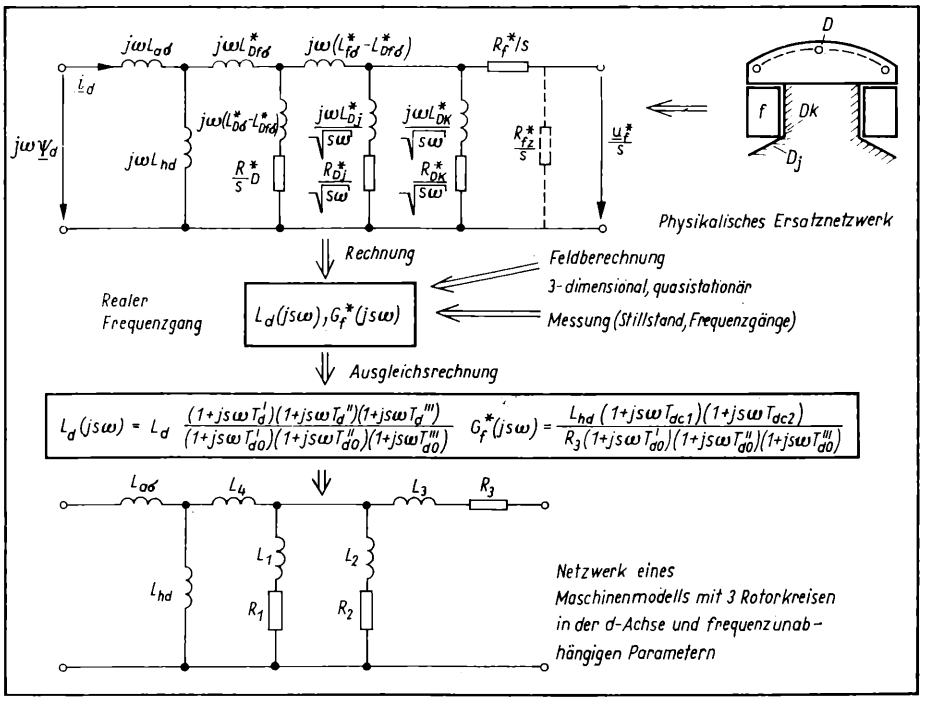


Bild 5. Mit dem DM berechneter asynchroner Hochlauf einer mit $\frac{1}{5}$ M_n belasteten 10-MVA-Synchronmaschine und Grobsynchronisation bei $s = 0{,}01$
a) ohne Hauptwegsättigung; b) mit Hauptwegsättigung

Bild 6. Experimentell ermittelte Frequenzgänge der Admittanzoperatoren und Anpassung durch Frequenzcharakteristiken mit konstanten Parametern nach [11]
a) (oben) $1/x_d$ (js); b) (unten) $1/x_q$ (js)
+ Meßwerte; ——— Modell mit 3 + 3 Rotorkreisen; – – – – Modell mit 2 + 2 Rotorkreisen

Bild 7. Ermittlung der Längsachsenparameter einer Synchronmaschine mit ausgeprägten Polen sowie massivem Polkern und Rotorjoch bei Vorgabe eines Maschinenmodells mit 3 Rotorkreisen in der Achse $\left(L^*_{D\ldots} \sim \sqrt{\frac{\mu}{x}},\ R^*_{D\ldots} \sim \omega\sqrt{\frac{\mu}{x}}\right)$

PERSÖNLICHES

Ehrenpromotion des syrischen Ministers für Elektroenergie, Dipl.-Ing. Kamel Baba, an der Technischen Universität Dresden

Mit der Verleihung der akademischen Würde eines Doktor-Ingenieurs ehrenhalber (Dr.-Ing. E. h.) „in Anerkennung seiner wissenschaftlichen und wissenschafts-organisatorischen Leistungen beim Aufbau und Betrieb des Elektroenergie-Versorgungssystems der Syrischen Arabischen Republik sowie seinem Beitrag zur Erhöhung des Ansehens der DDR und der TU Dresden im arabischen Raum" an Minister *Kamel Baba* würdigte die Technische Universität Dresden im Oktober 1988 die Leistungen eines hervorragenden Staatsmannes, Wirtschaftsfunktionärs und Ingenieurs.

Minister Dr.-Ing. E. h. *Kamel Baba* ist ein Absolvent der Technischen Universität Dresden.

Sein über 20jähriges politisches und ingenieurwissenschaftliches Wirken bei der umfassenden Elektrifizierung der Syrischen Arabischen Republik in leitenden Positionen der elektroenergetischen Basis, seit 1984 als Minister für Elektroenergie, war und ist geprägt von einer ständigen Vertiefung der wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit mit der DDR bei der Lösung energie-wirtschaftlicher Probleme.

Auf der Grundlage seiner ausgezeichneten Kenntnisse über die Leistungsfähigkeit der DDR-Industrie auf dem Gebiet der Elektroenergieausrüstungen entwickelten sich auch die Handelsbeziehungen zum beiderseitigen volkswirtschaftlichen Nutzen mit bedeutender Ausstrahlung auf den arabischen Raum.

Große Aufmerksamkeit und vielseitige persönliche Initiativen widmete der Ehrenpromovend den Fragen der Aus- und Weiterbildung von Kadern für die Energieversorgung seiner syrischen Heimat an wissenschaftlichen Einrichtungen der DDR bzw. durch Experteneinsätze von DDR-Wissenschaftlern in der Syrischen Arabischen Republik.

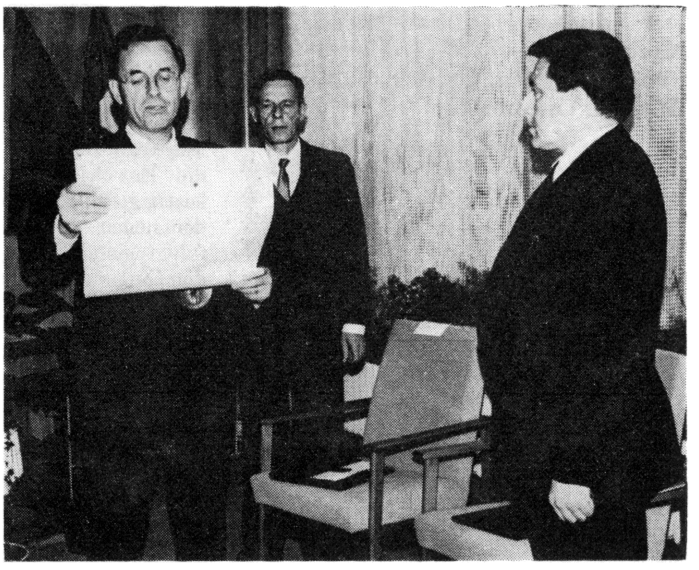
Aus der Realisierung des 1982 unterzeichneten „gemeinsamen Programms über die weitere wirtschaftliche, industrielle und wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit bis zum Jahre 1990 zwischen der Syrischen Arabischen Republik und der DDR" ergaben sich Verpflichtungen für die Technische Universität Dresden. Zugleich wurden damit auch die seit über 25 Jahren bestehenden Kontakte der TU Dresden mit wissenschaftlichen Einrichtungen der Syrischen Arabischen Republik bestätigt.

Bereits 1968 wurde eine Universitätsvereinbarung zwischen der TU Dresden und der Universität von Damaskus zur wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit auf den Gebieten der Elektrotechnik, des Maschinenbaus und der Architektur abgeschlossen und seitdem durch den Austausch von Wissenschaftlern, durch langfristige Experteneinsätze sowie kurzfristige Studienaufenthalte syrischer Studentengruppen an der TU Dresden mit Leben erfüllt.

Wissenschaftskontakte der TU Dresden bestehen auch seit langem zu den Universitäten in Aleppo und Lattakia. Auf der Grundlage von Regierungsvereinbarungen absolvierten seit 1962 weit über 100 syrische Bürger ein Studium an der TU Dresden oder erwarben hier den akademischen Grad eines Doktors. Gegenwärtig sind an der TU Dresden 139 syrische Bürger immatrikuliert bzw. befinden sich in einer Aspirantur.

H. Böhme, Dresden

EA 3033



Dipl.-Ing. *Kamel Baba* (rechts), Minister für Elektroenergie der Syrischen Arabischen Republik, erhält die Urkunde zur Verleihung der Ehrendoktorwürde (Dr.-Ing. E. h.) der Technischen Universität Dresden vom Rektor, Magnifizenz Prof. Dr. sc. techn. *H.-J. Jacobs* (links), und dem Dekan der Fakultät Elektrotechnik/Elektronik, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. *W. Mosch* (Mitte).
Foto: TU Dresden

Vorgabe der Anfangs- und Betriebsbedingungen gelöst werden. In Maschinenmodellen mit einer vollständigen Darstellung des Dämpferkäfigs wird jede einzelne, zur d- und q-Achse symmetrisch liegende Dämpfermasche durch eine Spannungs- und eine Flußkettungsgleichung beschrieben [14]. Dieses Modell ermöglicht die Berücksichtigung

- unterschiedlicher Stab- und Kurzschlußringabmessungen und Materialien
- ungleicher Abstände zwischen den Dämpferstäben
- der Sättigung bestimmter Magnetkreisabsohnitte
- der Stromverdrängung im Kurzschlußkäfig.

Dem vollständigen Dämpferkäfigmodell immanent ist die Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der Stromverteilung im Käfig. Die Annahme einer allgemeingültigen Stromverteilung, die bei der Substitution des tatsächlichen Käfigs durch Ersatzdämpferwicklungen erforderlich ist, ist gegenstandslos. Die Eigenparameter der Rotorkreise sind nur rechnerisch bestimmbar [14].

Ausgehend von den vorgestellten, für die Simulation des Betriebsverhaltens von Synchronmaschinen sehr zweckmäßigen Modellklassen bestehen die nächsten Aufgaben darin, diese Modellklassen durch spezielle Modellerweiterungen noch zu qualifizieren und experimentell zu bestätigen.

Literatur

[1] *Laible, Th.:* Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb. Berlin (West), Göttingen, Heidelberg: Springer Verlag 1952

[2] *Park, R. H.:* Two-reaction-theory of synchronous maschines. Trans. A.I.E.E. 48 (1926), S. 716

[3] *Müller, G.:* Elektrische Maschinen – Betriebsverhalten rotierender elektrischer Maschinen. Berlin: VEB Verlag Technik 1985

[4] *Bunzel, E.; Oswald, B.:* Modell zur Simulation des nichtstationären Betriebsverhaltens geregelter Synchrongeneratoren zur Sicherung der Elektroenergieversorgung. Wiss. Z. TU Dresden 36 (1987) 3, S. 157–167

[5] *Bunzel, E.; Oswald, B.:* Quasistationäres Computermodell von Drehstrommaschinen zur Simulation nichtstationärer Betriebszustände mit nichtsinusförmigen Betriebsgrößen. 11. Wiss. Konferenz der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden, 10.–12. 11. 1987, Themengruppe M, S. 32–35

[6] *Vogt, K.; Bunzel, E.; Oswald, B.; Schubert, P.:* Das Görgessche Phänomen. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 5, S. 163–165

[7] *Canay, M.:* Drehmomentgleichungen und deren Gültigkeitsbereich – Einfluß auf mechanische Drehmomente in der Welle einer Synchronmaschine. etz Archiv Bd. 8 (1986) 9, S. 325–330

[8] *Bunzel, E.; Krüger, H.-T.:* Allgemeines Gleichungssystem der magnetisch erregten Synchronmaschine bei Einführung von Ersatzdämpferwicklungen für die Berechnung nichtstationärer Vorgänge. Wiss. Zeitschrift der TU Dresden 35 (1986) 5, S. 65–72

[9] *Bunzel, E.; Krüger, H.-T.:* Berechnung der elektromagnetischen Parameter magnetisch erregter Synchronmaschinen bei Einführung von Ersatzdämpferwicklungen. Wiss. Z. TU Dresden 35 (1986) 5, S. 73–81

[10] *Canay, M.:* Ersatzschemata der Synchronmaschine zur Berechnung von Polradgrößen bei nichtstationären Vorgängen sowie asynchronem Hochlauf. Teil I Turbogeneratoren, Teil II Schenkelpolmaschinen. Brown Boveri Mitteilungen, Baden 56 (1969) 2, S. 60–71; 57 (1970) 3, S. 135–145

[11] *Canay, M.:* Identifikation und Ermittlung der Parameter von Synchronmaschinen. Brown Boveri Mitteilungen, Baden (1984) 6/7, S. 299–304

[12] *Canay, M.:* Verbesserte Theorie zur Behandlung des unterschiedlichen Stabilitätsverhaltens von Synchrongeneratoren und -motoren. Internationale Wissenschaftlich-Technische Tagung, 7. 6.–9. 6. 1988 Dresden, Vortrag D 7, S. 141 bis 143

[13] *Simond, J.-J.:* Simulation des Systems Synchronmaschine-Stromrichter-Drehstromnetz: Einfluß der Läuferstruktur und des Betriebspunktes auf die Strom- und Drehmoment-Oberschwingungen. etz Archiv Bd. 9 (1987) 3, S. 71–76

[14] *Bunzel, E.; Krüger, H.-T.:* Ausführliches Gleichungssystem magnetisch erregter Synchronmaschinen mit Kurzschlußkäfig. ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 12, S. 456–460

EA 6009

Prof. (em.) Dipl.-Ing. Dr.-Ing. e. h. Kurt Pommer – 85 Jahre

Kurt Pommer ist ein verdienstvoller Jubilar, dem das Glück zuteil wurde, am 5. Mai 1989 seinen 85. Geburtstag im Kreise seiner Familie und hochgeschätzt von seinen Freunden, Schülern und Fachkollegen, begehen zu können. Er ist eine Persönlichkeit, die für sich in Anspruch nehmen kann, ein entscheidendes Kapitel der 40jährigen Geschichte der Deutschen Demokratischen Republik mitgeschrieben und mitbestimmt zu haben.

Prof. *Kurt Pommer*, als Werkdirektor des Sachsenwerkes Niedersedlitz einer der Pioniere des Elektromaschinenbaus in der Nachkriegszeit, als Professor an der TH Dresden und TU Dresden Lehrer und Erzieher einer Generation von Ingenieuren, Wissenschaftlern, als Institutsdirektor und Rektor an der TU Dresden, als Mitglied der Akademie der Wissenschaften und über seine Mitwirkung in staatlichen und gesellschaftlichen Gremien am Aufbau des Hochschulwesens und der Entwicklung von Wissenschaft und Technik in der DDR maßgeblich beteiligt, kann auf ein Berufsleben zurückblicken, das in jeder Phase erfolgreich war.

Kennzeichnend für sein Wirken war immer sein hoher persönlicher Einsatz, sein Weitblick und damit im Zusammenhang stehend die Fähigkeit, aus dem jeweils Gegenwärtigem die Anforderungen an die Zukunft abzuleiten und seine Mitarbeiter und Schüler für die Lösung der Aufgaben zu begeistern. Mit Stolz kann der Jubilar heute auf eine große Anzahl von Schülern blicken, die getreu seinem Vorbild in enger Bindung an die Partei der Arbeiterklasse in leitenden Funktionen in Schwerpunktbereichen der Volkswirtschaft und als Hochschullehrer an Bildungsstätten der DDR sein Werk fortsetzen.

Seinen Freunden, Fachkollegen und Schülern ist es ein Bedürfnis, Prof. *Kurt Pommer* anläßlich seines Jubiläums herzliche Glückwünsche zu übermitteln, Dank zu sagen für die Jahre der gemeinsamen Arbeit und beste Wünsche für Gesundheit und Wohlergehen auszusprechen. Redaktionsbeirat und Redaktion der Zeitschrift ELEKTRIE schließen sich diesem Glückwunsch in aller Herzlichkeit an.

E. Paulig, Dresden EA 3085

Nachruf für Prof. Dr. techn. Dr.-Ing. e. h. Günther Oberdorfer

Am 8. März d. J. verstarb, kurz vor seinem 90. Geburtstag, Prof. Dr. techn. Dr.-Ing. e. h. *Günter Oberdorfer*. Die Elektrotechnik verlor mit ihm einen bis ins hohe Alter schöpferischen Wissenschaftler.

Prof. *Oberdorfer* wurde am 2. April 1899 in Tirol geboren. Er studierte an der TU Wien, die er 1924 als Diplomingenieur der Elektrotechnik absolvierte. 1926 promovierte er, und 1928 habilitierte er. Von 1923 bis 1937 war er in der österreichischen Elektroindustrie (Siemens-Schuckert-Werke) tätig und arbeitete im Versuchs- und Prüffeld und im zentralen Projektierungsbüro. Er führte in dieser Zeit mannigfaltige Arbeiten auf dem Gebiet von Entwurf und Betrieb von Kraftwerken, Schaltstationen, Orts- und Verteilernetzwerken sowie Übertragungsleitungen durch, eine Tätigkeit, die ihm reiche Erfahrungen vermittelte. Die enge Verbindung mit der Industrie hat er sein ganzes Leben gepflegt. Sie war ohne Zweifel eine der Ursachen, warum seine Lehre so lebensnah war.

Prof. *Oberdorfer* wurde 1937 an die TH Charlottenburg in Berlin für das Gebiet Grundlagen der Elektrotechnik und Theoretische Elektrotechnik berufen. Gleichzeitig wurde er Direktor des elektrotechnischen Instituts mit dem angeschlossenen Röhrenlaboratorium und dem Lehrstuhl für Elektronen- und Ionenlehre und Gasentladungstechnik. Dieses Institut zählte damals zu den bedeutendsten Zentren für Forschung und Lehre auf dem Gebiet.

Die aktive Tätigkeit von Prof. *Oberdorfer* erstreckt sich über eine Periode der Entwicklung der Elektrotechnik, in der sich bereits wesentliche Veränderungen in ihren Konzepten angebahnt haben (Informationstheorie, Systemtheorie). Eingeleitet wurde diese Entwicklung mit einer starken Mathematisierung der Elektrotechnik und dem Einzug der Theorien der modernen Physik in die Ingenieurarbeit.

Die Berliner Periode im wissenschaftlichen Leben von Prof. *Oberdorfer* zeichnet sich durch eine beachtliche Produktivität aus. Hier fanden seine Industrieerfahrung, seine didaktisch-pädagogischen Fähigkeiten sowie seine außerordentlichen theoretischen Kenntnisse volle Entfaltung. Er erkannte sehr früh die Rolle, die die Mathematik für die Entwicklung der Elektrotechnik als leistungsfähige Wissenschaft zur Lösung der neuen anspruchsvollen Aufgaben befähigte, und bemühte sich, den Studenten den Zugang zu den modernen mathematischen Theorien zu erleichtern. Verstärkte Aufmerksamkeit widmete er auch der Vertiefung der physikalischen Grundlagen der Elektrotechnik besonders auf den Gebieten von Effekten, die in Verbindung mit den Mechanismen der Stromleitung stehen.

Seine Vorlesungen, lebensnah und packend, waren voll von aktuellen wissenschaftlich-technischen Problemen, an die er seine Hörer sehr früh heranführte und so zur wissenschaftlichen Arbeit motivierte.

1946 wurde Prof. *Oberdorfer* an die Technische Hochschule in Graz als ordentlicher Professor für Bau und Betrieb elektrischer Anlagen mit den Lehraufträgen Theoretische Elektrotechnik, Vierpole und Leitungen, elektrische Bahnen, Hochspannungstechnik sowie Maßsysteme und Normung berufen.

Sein besonderes Interesse galt in dieser Zeit der Konzeption für den Ausbau der Hochspannungstechnik.

Prof. *Oberdorfer* erkannte auch die Möglichkeiten, die die Elektrotechnik für andere Wissensbereiche eröffnete, und förderte den Ausbau interdisziplinärer Bereiche. Er orientierte rechtzeitig junge Wissenschaftler auf das Grenzgebiet zwischen Medizin und Elektrotechnik und förderte ihre Entwicklung.

Prof. *Oberdorfer* ist Autor von mehr als zehn Büchern und Monographien über spezielle Gebiete der Elektrotechnik. Hierzu gehören, um nur einige zu nennen, die Monographien: „Das Rechnen mit symmetrischen Komponenten", „Der Erdschluß und seine Bekämpfung", „Die Ortskurventheorie der Wechselstromtechnik" sowie das vierbändige „Lehrbuch der Elektrotechnik" und zahlreiche Veröffentlichungen zu speziellen Problemen der Elektroenergietechnik.

Jahrelang hat sich Prof. *Oberdorfer* mit Problemen der Maßsysteme, der Größen und Einheiten befaßt. Hier hat er eigene originelle Konzepte entwickelt und auf diesem Gebiet maßgebend die Arbeit vieler Ausschüsse beeinflußt.

Prof. *Oberdorfer* ist ein international bekannter Wissenschaftler. Er war Mitglied vieler wissenschaftlich-technischer Organisationen, vieler Ausschüsse der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC). Er war Mitglied der Conférence Internationale des Grandes Réseaux Electrique et a haute tension (CIGRE) des österreichischen Normenausschusses usw.

Prof. *Oberdorfer* war einer der wenigen universell vorbereiteten Wissenschaftler auf dem Gebiet der Elektrotechnik. Das Bild von ihm wäre nicht vollständig, wenn man nicht sein Interesse für bildende Künste, Musik und Geschichte der Kultur erwähnt.

Prof. *Oberdorfer* hat sich mit seiner ganzen Person für das Gespräch und für die Kommunikation von Wissenschaftlern über Grenzen eingesetzt, auch über Grenzen von Staaten mit unterschiedlichen Gesellschaftsordnungen.

Die Entwicklung der Technik und der Technologie und ihre Auswirkungen auf den Menschen und auf die Natur ließen Professor *Oberdorfer* nicht unberührt. Er erkannte bald die Grenzen der Belastbarkeit unserer Umwelt noch in einer Zeit, als naive Technologiegläubigkeit die Sicht vernebelten. Die ernsten Fragen, die diese Entwicklung aufwirft, beschäftigten ihn ständig.

Prof. *Oberdorfer* ist eng mit der Entwicklung der TH Ilmenau verbunden. Er besuchte die Hochschule oft. Es wurden die veränderte Rolle der Wissenschaft in der Gesellschaft und die Widersprüche, die sich aus der Entwicklung der Wissenschaft in den letzten Jahren ergeben haben, diskutiert.

Prof. *Oberdorfer* hat viele Ehrungen erfahren. So verlieh ihm die TH Ilmenau für seinen Beitrag für die Entwicklung der Elektrotechnik-Elektronik die Würde eines Dr.-Ing. e. h.

Das verdienstvolle Wirken von Prof. *Oberdorfer* hat tiefe Spuren hinterlassen.

E. Philippow, Ilmenau EA 3082

Nachruf für NPT Prof. em. Dr. rer. oec. Dr. h. c. Dipl.-Ing. Hans Joachim Hildebrand

Am 30. Januar 1989 verstarb im Alter von 73 Jahren Nationalpreisträger Prof. em. Dr. rer. oec. Dr. h. c. Dipl.-Ing. *Hans-Joachim Hildebrand*.

Wir trauern um einen Genossen, dessen ganzes Wirken als Praktiker, Wissenschaftler und Hochschullehrer mit Leidenschaft und Hingabe der sozialistischen Energiewirtschaft und ihrer Zukunft gewidmet war.

Hans-Joachim Hildebrand wurde am 6. November 1915 in Dresden geboren. Nach dem Besuch des Gymnasiums studierte er von 1937 bis 1939 an der Technischen Hochschule Dresden und von 1942 bis 1943 an der Technischen Hochschule Aachen. Als Diplomingenieur für Elektrotechnik trat er 1944 erst an der Technischen Hochschule Braunschweig und dann an der Technischen Hochschule Dresden eine Wissenschaftliche Assistenz an.

Im März 1946 nahm er im Elektrizitätsverband Gröba eine Tätigkeit als technischer Sachbearbeiter auf. 1947 war er Sonderbeauftragter für den Wiederaufbau des Kraftwerkes Plessa. Er wirkte als Oberingenieur und Kreislastverteiler. 1949 wurde er zum ersten Direktor und Vorsitzenden des Vorstandes des Elektrizitätsverbandes Gröba berufen.

Sein fachliches Können und sein bewußtes politisches Handeln führten ihn schnell in verantwortliche Funktionen. 1950 wurde er nach Eingliederung des Elektrizitätsverbandes Gröba in die VVB Energiebezirk Ost als Technischer Leiter der Betriebsdirektion Radebeul tätig. Bereits 1951 erhielt er den Auftrag, als Hauptdirektor die VVB Energiebezirk Nord aufzubauen. Mit der Auflösung der Vereinigung Volkseigener Betriebe übernahm er 1954 den neugegründeten VEB Energieversorgung des Bezirkes Dresden als Werkdirektor.

Die praktische Arbeit und die konsequente Art seines Denkens und Handelns führten zur Erkenntnis: Das Bewältigen der vor der Energiewirtschaft stehenden Aufgaben erfordert gesamtenergiewirtschaftliches Denken, die Einheit von Ökonomie und Technik und ein vom Primat der Volkswirtschaft ausgehendes, komplexes, den Interessen der Arbeiterklasse und ihrer Verbündeten dienendes Herangehen.

Obwohl bereits in außerordentlich verantwortlichen Funktionen tätig, zog er aus dieser Erkenntnis die Konsequenz: Als Diplomingenieur der Elektrotechnik nahm er ein Fernstudium auf, das er 1957 an der Karl-Marx-Universität Leipzig als Diplomwirtschaftler abschließt. Auf diese Synthese von technischer und ökonomischer Ausbildung baute er seine zielstrebige wissenschaftliche Arbeit auf. Sie hatte wesentlichen Anteil an seiner außerordentlichen fachlichen Autorität auf energiewirtschaftlichem Gebiet.

1956 folgte er dem Ruf als Professor für „Ökonomie, Organisation und Planung" und als Direktor des „Institutes für Ökonomie der Energetik" an die Technische Hochschule Dresden. Der Übergang in das Hochschulwesen entfernte ihn nicht von der energiewirtschaftlichen Praxis. Er entwickelte eine Schule gesamtenergiewirtschaftlichen Denkens, die ausgezeichnete Detailkenntnisse auf ökonomischem, naturwissenschaftlichem und technisch-technologischem Gebiet enthält, ja voraussetzt. Sie befähigt seine Schüler und viele Fachleute der Praxis gesamtenergiewirtschaftlich, weit vorausschauend komplex zu denken und entsprechend praktisch zu handeln. Dieser Prozeß wurde besonders durch seine Fähigkeit befruchtet, entscheidende Kettenglieder auf energiewirtschaftlich-ökonomischem Gebiet Jahre voraus zu erkennen und durch eigene und von ihm initiierte wissenschaftliche Arbeiten seiner Schüler entsprechenden Vorlauf zu schaffen. Hervorzuheben sind dabei besonders:

- Die Entwicklung der Aufwandsrechnung zur Berücksichtigung des Zeitfaktors bei der Bewertung des gesellschaftlichen Aufwandes für Investitions- und Rationalisierungsmaßnahmen. Sie war ihrer Zeit um Jahre voraus.
- Das frühe Erkennen der außerordentlichen Bedeutung der rationellen Energieanwendung mit entsprechenden Konsequenzen für die Ausbildung und Forschung.
- Sein Einsatz für moderne Leitungsstrukturen, die den energiewirtschaftlichen und volkswirtschaftlichen Erfordernissen gerecht werden.
- Das frühzeitige Erkennen der Notwendigkeit, mathematisch-ökonomische Methoden zu nutzen und umfassend die moderne Rechentechnik anzuwenden.
- Die Tatsache, daß er schon in den frühen 60er Jahren seine Aufmerksamkeit auf die komplexe Bilanzierung und Optimierung in der energiewirtschaftlichen Planung in Einheit von rationeller Energieanwendung und wirtschaftlicher Energieversorgung unter Beachtung der nationalen und internationalen Reproduktionsbedingungen lenkte.
- Sein unermüdliches Wirken für eine ausreichende Beachtung der Elektrifizierung als eine wesentliche Grundlage für eine moderne, effektive Volkswirtschaft.

Mit der Bildung der Ingenieurhochschulen 1969 verstand er es, als Gründungsrektor der Ingenieurhochschule Zittau sein erfolgreiches Wirken auf diese neue sozialistische Bildungsstätte zu übertragen und viele Verbündete zu gewinnen, die bei Wahrung und Förderung ihrer Individualität in seinem Sinne wirken. Im Mai 1988 konnte er als Emeritus erleben, wie im Ergebnis seines Wirkens, des Wirkens seiner Nachfolger und des gesamten Kollektivs die Ingenieurhochschule Zittau den Status „Technische Hochschule" erhielt.

Professor *Hildebrand* war als Wissenschaftler und Hochschullehrer stets ein begehrter, streitbarer, oft auch unbequemer, aber unverzichtbarer Partner für die Praxis. Sein Wort hatte Gewicht.

Vom Ministerrat berufen, erwarb er sich als langjähriger Vorsitzender der „Gruppe Energie des Forschungsrates" und der „Ständigen Prognosegruppe Energie" außerordentliche Verdienste für eine von der Wissenschaft durchdrungene Entscheidungsvorbereitung für die Partei- und Staatsführung auf energiewirtschaftlichem Gebiet.

Er genoß durch sein Wirken, das Auftreten auf internationalen Tagungen, seine mehr als 100 wissenschaftlichen Veröffentlichungen und seine 5 Bücher, darunter das auch international geschätzte Hochschullehrbuch „Wirtschaftliche Energieversorgung", hohe Anerkennung.

Seine Persönlichkeit hat wesentlich dazu beigetragen, daß die Energiewirtschaftler der DDR in die „Weltenergiekonferenz" aufgenommen wurden. Professor *Hildebrand* stand lange Jahre als Präsident dem „Nationalkomitee der DDR in der WEC" vor und war danach sein Ehrenvorsitzender. In dieser Funktion erwarb er sich auch innerhalb der WEC große Anerkennung und Verdienste. Bis 1986 leistete er als Vizepräsident des „Internationalen Exekutivkomitees" der WEC eine hoch anerkannte Arbeit.

Sein Wirken als Wissenschaftler fand staatliche Anerkennung durch solch hohe Auszeichnungen und Ehrentitel wie den „Vaterländischen Verdienstorden" in Gold, den „Nationalpreis für Wissenschaft und Technik", die Ehrentitel „Verdienter Techniker", „Verdienter Aktivist" und die „Verdienstmedaille der Energiewirtschaft".

Wenn er von der TU Dresden mit dem Dr. h. c. und für sein Wirken als „Verdienter Hochschullehrer" gewürdigt wurde, so findet damit auch Anerkennung, daß allein 11 seiner Schüler zu ordentlichen Professoren und Dozenten berufen werden konnten.

Wir verlieren mit *Hans-Joachim Hildebrand* eine jener hervorragender Persönlichkeiten, deren langjähriges Wirken auf nationaler und internationaler Ebene wesentlich dazu beigetragen hat, daß in Fachkreisen die Energiewirtschaft der DDR und damit unser Staat hohes Ansehen genießt.

P. Hedrich; W. Riesner, Zittau EA 3068

TAGUNGEN

Zentrale und dezentrale Konzepte der Ausgangsrückführung bei Mehrgrößenregelung

142. Sektionskolloquium Automatisierungstechnik der Technischen Universität Karl-Marx-Stadt am 12. Januar 1989

Der Direktor der Sektion Automatisierungstechnik begrüßte den Referenten zu dieser Thematik, Prof. Dr. sc. techn. *U. Korn*, Leiter des Wissenschaftsbereiches „Regelungstechnik und Prozeßsteuerung "der Sektion Automatisierungstechnik und Elektrotechnik der Technischen Universität Magdeburg. Nach einführender Darstellung der Forschungs- und Lehraufgaben des von ihm geleiteten Wissenschaftsbereiches ging er auf die Konfiguration einer Automatisierungsanlage und Darstellung eines möglichen Maximalausbaus der Struktur dieser Anlage ein. Als Zielstellungen der Regelungsaufgabe auf der Basisebene wurden

— „schöne" Prozeßstabilisierung und
— Störgrößenkompensation

erläutert.
Die bei der Regelung zu berücksichtigenden Randbedingungen und/oder Praxisforderungen bestehen in

— Betriebssicherheit der Basisregelung (Stabilitätssicherung bei Ausfall einer Teilregelung)
— sequenziellem Teilregleranschluß bei der Inbetriebnahme (sequenzielle Stabilität)
— Transparenz der Basisregelungsstruktur und der zugrunde liegenden regelungstechnischen Entwurfsverfahren (einfache multivariable Basisregler).

Unter Hinweis auf weitere bzw. sekundäre Randbedingungen erläuterte Prof. *Korn* die Hauptforderungen an die Stabilisierungsschicht:

1. Stabilisierung (Verschiebung gegebenenfalls instabiler Pole nach links)
2. keine bleibende Abweichung auch nach aperiodischen Störungen
3. genügend gutes dynamisches Verhalten (nicht nur schlechthin „Pole links").

Aus den Hauptforderungen 1. und 3. ergibt sich eine Stabilisierung in erweitertem Sinne, d. h., es sind stabilitätsorientierte Entwurfsverfahren für Mehrgrößenregler im Zeitbereich bzw. Frequenzbereich erforderlich.
Aus der zweiten Hauptforderung ist abzuleiten, daß eine geschlossene Lösung für Mehrgrößenregler ein inneres Modellprinzip liefern sollte.
Für die Bearbeitung derartiger Probleme ist es notwendig, Modelle für die Klassen der Störungen zu formulieren. Ausgehend von Forschungsergebnissen und unter Darstellung des Gesamtsystems verwies der Referent auf häufige Schwachstellen der Systeme, wie:

— Modellsituation ist diffizil
  • unvollständige Einsicht in innere physikalische Zusammenhänge
  • großer Aufwand für hinreichend genaues Modell
  • Schwierigkeiten durch Nichtlinearitäten und Zeitvarianz
— Entwurfsalgorithmen sind nicht praktikabel genug.

Anhand einer Übersicht über die Arbeitsrichtungen beim „zentralen Entwurf strukturbeschränkter Mehrgrößenregler" erfolgte die detaillierte Erläuterung der erforderlichen Arbeitsschritte, die unter anderem auch die Untersuchung des statischen und dynamischen Ein- und Ausgangsverhaltens enthält.
Nach einigen Bemerkungen bezüglich des Übergangs zur Gewichtsfunktion durch Differentiation wandte sich der Referent der graphentheoretischen Betrachtungsweise zu. Über das Zustandsmodell, z. B. nach Linearisierung in einem Arbeitspunkt, das in Graphen darstellbar ist, kann die „Erreichbarkeitsmatrix" unter Einbeziehung der Rechentechnik gewonnen werden.
Bei der weiteren Darstellung des Konzepts der zentralen oder dezentralen Ausgangsrückführung erläuterte Prof. *Korn* auf mathematischer Basis die Zusammenhänge beim ungeregelten und geregelten System. Dabei verwies er bezüglich der geschlossenen Berechnung der Gradienten auf den Einsatz möglichst leistungsfähiger Gradientenverfahren, um im Ergebnis eine Strukturbestimmung der Ausgangsrückführung durchzuführen.
Abschließend stellte er einen Algorithmus zum Reglerentwurf vor, der auf

— gewünschten Eigenwerten
— gewünschten Strukturbeschränkungen
— gewünschten Wichtungsfaktoren
— entsprechenden Anfangswerten

basiert.
Wie anhand realisierter Beispiele nachgewiesen wurde, hat sich für die Minimierung speziell der BFGS-Algorithmus als vorteilhaft erwiesen.

G. Tippmann, Karl-Marx-Stadt EA 3032

Hochspannungsschaltgeräte

Gemeinsam mit der KDT-Fachsektion „Elektroenergieversorgung und Anlagenautomatisierung" der TH Zittau hat der Fachunterausschuß 13.3 „Hochspannungsschaltgeräte" am 9. und 10. November 1988 in Zittau das KDT-Fachkolloquium „Hochspannungsschaltgeräte" durchgeführt.
Am Kolloquium nahmen etwa 120 Fachkollegen aus der DDR teil: Vertreter von Schaltgerätewerken, aus Kraftwerken, aus dem Kraftwerksanlagenbau, von Energiekombinaten, vom VEB Verbundnetz Elektroenergie, vom Staatlichen Amt für Technische Überwachung, vom Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung sowie von Hochschulen.
Im Mittelpunkt der Diskussionen standen Betriebserfahrungen mit den derzeitigen Hochspannungsschaltgeräten, die Weiterentwicklung der SF_6- und Vakuumschaltertechnik aus der Sicht des Einsatzes in der DDR, die Schnittstellengestaltung Hochspannungsschaltgerät — Mikrorechnersteuerung, die Weiterentwicklung der Schalterprüftechnik und des Standards TGL 16441 „Hochspannungsschaltgeräte" sowie Umfang und Aussagekraft der verschiedenen Diagnoseverfahren.

Das Kolloquium fand bei allen Teilnehmern große Resonanz und gab viele Informationen und Impulse für die weitere Arbeit.

Vorträge[1])

Ambrosch, H.: Anforderungen an moderne Hochspannungsschaltgeräte — Internationaler Stand und Entwicklungstendenzen
Rother, W.: Rechnergestützte Schaltgeräteentwicklung — Forschungsergebnisse und deren Anwendung in der Industrie
Buchholz, B.: Anforderungen und Gestaltung der Schnittstellen Hochspannungsschaltgeräte — Mikrorechnersteuerung
Schwarz, J.; Paul, F.; Müller, O.: Erfahrungen bei der Entwicklung von SF_6-Leistungsschaltern und Konsequenzen für die Anwender
Müller, O.; Breuer, S.; Kudoke, M.: Kurzschließer für höchste Schutzgüte
Oberthür, J.; Fink, H.: Erfahrungen bei der Entwicklung von Vakuumleistungsschaltern und Konsequenzen für den Anwender
Gorgius, D.; Noack, F.: Entwicklung der technischen Diagnostik an Hochspannungsschaltgeräten
Fiebig, R.: Die Weiterentwicklung der Schaltgerätestandards in der IEC und Auswirkungen auf die DDR-Standards für Schaltgeräte
Löbl, H.; Böhme, H.: Zur Erwärmungsprüfung von Hochspannungsschaltgeräten
Müller, K.: Betriebserfahrungen und Forderungen an die Weiterentwicklung von Schaltgeräten bis 123 kV
Breuer, M.: Vernickelte Kontakte erhöhen die Zuverlässigkeit der Geräte
Noack, F.; Ambrosch, H.: Sonderforderungen an Hochspannungsschaltgeräte in Kraftwerken mit großen Blockeinheiten

H. Ambrosch, Dresden EA 3015

[1]) Von allen Vorträgen stehen Kurzfassungen zur Verfügung. Der einleitende Beitrag wurde in der ELEKTRIE 42 (1988) Heft 11 veröffentlicht.

BÜCHER

Regelungstechnik auf dem Personalcomputer

Von *M. Peschel.* Berlin: VEB Verlag Technik. 1. Auflage 1988. 206 Seiten, 102 Bilder, 40 Programme, DDR 22,— M.

Der Autor versteht das vorgelegte Buch als Beitrag zur Vermittlung von Wissen auf dem Gebiet der Regelungstechnik unter intensiver Ausnutzung der durch Personalcomputer gebotenen Möglichkeiten. Auf 60 Seiten sind Programme angegeben, geschrieben in „SIMONS BASIC", die mühelos auf unterschiedlichen Personalcomputertypen lauffähig sind und geeignet sind, die im Buch vermittelten Zusammenhänge zu veranschaulichen oder im Hörsaal vor Studenten zu demonstrieren.
Das Buch ist aus der speziellen Vorlesung „Modellierung und Simulation regelungstechnischer Systeme" hervorgegangen. Es setzt beim Leser Grundkenntnisse der Systemtheorie und Regelungstechnik voraus und unterscheidet sich von üblichen Darstellungen durch eine mehr mathematische Orientierung. So wird zunächst der Begriff der Selbstreferenz eingeführt und die Prinzipien der Regelung werden daraus abgeleitet. Die Einführung in die Signaltheorie ist auf die Nutzung auf Rechnern zugeschnitten. Signalgeneratoren werden ausführlich behandelt, ebenso die Transfor-

mation der Signale aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich und umgekehrt. Lineare Übertragungsglieder und lineare Regelungssysteme sind Gegenstand der Abschnitte 4 und 5. Die Darstellung entspricht dem für Ingenieure Gewohnten, sie wird durch entsprechende BASIC-Programme ergänzt. Der praxisorientierte Leser würde sich einen stärkeren Bezug auf praktische Probleme, z.B. in Form von Beispielen, wünschen. Bemerkenswert sind der Abschnitt 6. „Nichtlineare Regelungsprobleme" und der Abschnitt 7. „Anwendung regelungstechnischer Methodiken". Diese gehen wesentlich über das Maß des Bekannten und Gewohnten hinaus. Neuartige Regelkonzepte werden eingeführt. Die Darstellung zielt auf die Behandlung nichttechnischer (biologischer, ökonomischer, ökologischer) Systeme. Sie widerspiegelt das spezielle Forschungsgebiet des Autors. Mögliche Rückwirkungen auf die Konzeption technischer Systeme sind noch nicht voll überschaubar. Neuartige Regler, die auf der Wachstumstheorie beruhen, werden durch Programme untersetzt. Auch eine Einführung in die adaptiven Mehrfachregler wird gegeben, Beigefügt ist ein rechnergestütztes Entscheidungshilfsmittel zur polyoptimalen Kennwertermittlung. Der Bogen wird sodann gespannt bis zu chaotischen Erscheinungen in Regelungssystemen mit Programmen zur Demonstration der entsprechenden Bifurkationen.
Schließlich wird eine Einführung in ein neues Simulationshilfsmittel, die sogenannte Methode der Direkten Iteration gegeben.
Das von *M. Peschel* vorgelegte Buch ist unkonventionell bezüglich Stoffauswahl und Darstellung. Es vermittelt über die mitgeteilten Rechenprogramme hinaus eine Fülle neuer Denkanstöße, überläßt aber die praktische Umsetzung der Theorie zur Lösung technischer Aufgaben weitgehend dem Leser.

R. Schönfeld, Dresden EA 3071

Digitale Meßwertverarbeitung Methoden und Fallstudien

Von *M. Paul*. Berlin/Offenbach: VDE-Verlag 1987, 2. Auflage, 378 S., 134 Bilder, 3 Taf., Broschur

Die Entwicklung der Mikrorechentechnik bewirkt eine zunehmende Umstellung analoger Meßmethoden auf digitale Verfahren. Das beginnt bei den simplen Digitalvoltmetern, betrifft digitale Analogdaten-Erfassungssysteme und reicht bis zur digitalen Echtzeitermittlung von z.B. Mittelwerten, Leistungsdichtespektren und Korrelationsfunktionen. Mit einer Veringerung der leistungsbezogenen Kosten digitaler Bausteine und Systeme erschließen sich immer neue Anwendungsbereiche dieser Technik.

Das vorliegende Buch vermittelt dem Anwender eine praxisorientierte Beschreibung von Verfahren der digitalen Meßwertverarbeitung. Beispiele typischer Einsatzfälle digitaler Meßsysteme dienen der Veranschaulichung. Die theoretischen Grundlagen, die bereits in Verbindung mit Groß- und Prozeßrechnern entwickelt wurden, konnten aus der 1. Auflage (1982) unverändert übernommen werden. Das Literaturverzeichnis wurde aktualisiert.

Das Buch gliedert sich in vier Abschnitte. Im Teil *A* werden Probleme der digitalen Meßwerterfassung behandelt. Teil *B* umfaßt lineare digitale Methoden zur Meßwertverarbeitung mit der diskreten Fourier-Transformation, digitalen Filtern und digitalen Interpolationsverfahren. In Teil *C* werden drei nichtlineare digitale Verarbeitungsmethoden beschrieben: Digitale Korrelationsverfahren, Kurvenanpassung nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate und die Cepstrumanalyse. Teil *D* zeigt an einigen Fallbeispielen die praktische Anwendung der vorgestellten Algorithmen.
Für wichtige Algorithmen und Entwurfsmethoden werden Flußdiagramme oder FORTRAN-Programme angegeben.

F. Fischer, Dresden EA 3040

Zuverlässigkeitsstrukturen Modellbildung – Modellauswertung

Von *K. Reinschke* und *A. Usakov*. Berlin: VEB Verlag Technik 1987. 239 Seiten, 95 Bilder, 14 Taf.

Die Zuverlässigkeit technischer Systeme hat in den letzten Jahrzehnten sehr an Aufmerksamkeit gewonnen. Dem für die Planung und Betriebsführung elektrischer Energieversorgungsnetze verantwortlichen Ingenieur war sie schon lange eine bedeutende Eigenschaft der Netze. Die Zuverlässigkeitsstruktur wurde aber weitgehend mit der Topologie derselben und mit der Beherrschung des einfachen oder mehrfachen Ausfalls verknüpft. Die Boolsche Zuverlässigkeitstheorie schien dem zunächst sehr entgegenzukommen.
Eine systematische Schwachstellenanalyse im Netz, die notwendige Reserveleistung, die Netzform mit den möglichen Schaltzuständen, die Orte der Einspeiseleistungen, die Anfahrzeiten, die Blockgrößen, die Sternpunktbehandlung im Netz, das Betriebsregime, die automatische Wiedereinschaltung und anderes erzwingen es, die Zuverlässigkeitsstruktur systematisch zu erkunden und die Grenzen der Boolschen Zuverlässigkeitstheorie zu überspringen. Das vorliegende Buch dient der Zuverlässigkeitsmodellierung und besonders der anschaulichen Darstellung der Modelle durch Graphen. Dabei wird der für elektrische Netze wichtige Grad der Aufgabenerfüllung in Betracht gezogen.
Nach der Einführung gehen die Autoren auf die Zuverlässigkeit von Kommunikationsnetzen ein, wobei die zweiterminalen ausführlich behandelt werden. Der nächste Abschnitt dient den Zuverlässigkeitsmodellen, die nicht von vornherein einen netzförmigen Aufbau haben. Hier wird auch die eingangs erwähnte Abstufung der Niveaus der Arbeitsweise behandelt.
Das letzte Kapitel läßt die in den beiden vorangegangenen gegebenen oder geforderten Monotonieeigenschaften fallen. Hier wird der Prozeß mit Zustandsübergangsgraphen modelliert. Die eben auch gerade in Energieversorgungsnetzen anzunehmenden Regenerationszeitpunkte führen auf Markovsche Modelle. Zugleich wird auch gezeigt, wie die Modellierung auch mit Hilfe von Prozessen ohne Regenerationszeitpunkte erfolgen kann.
Die Zuverlässigkeitsmodelle werden also nicht als gegeben betrachtet, um von dort herauf die zugehörigen Probleme zu schließen. Hier steht die Zuverlässigkeitsstruktur im Vordergrund. Von ihr wird das zugehörige Modell abgeleitet. Die Darstellung ist anschaulich und weitgehend leicht verständlich. Abschnitte, die stärker mathematisch abgefaßt sind, erhielten (zur Warnung?) ein Sternchen. Es gibt nur 17 Sternchen bei über 50 Abschnitten.
Ein gut gewähltes Literaturverzeichnis und ein Sachwörterverzeichnis erleichtern die Arbeit mit dem für praktisch tätige Ingenieure, aber auch für Spezialisten empfehlenswerten Buch.

E. Muschick, Zittau EA 3039

Nodal Analysis of Electrical Networks

(Knotenanalyse elektrischer Netzwerke)

Von *G. Fodor*. Budapest: Akadémiai Kiadó 1988 (in englischer Sprache). 399 Seiten

Gegenstand des Buches ist die Darstellung von Methoden zur Formulierung der Gleichungen elektrischer Netzwerke, die anschließend manuell oder mit Hilfe von Rechnern gelöst werden können. Das Buch konzentriert sich dabei auf die Methode der Knotenanalyse der Netzwerke, d.h., es werden Variable eingeführt, die mit den Knoten des Netzwerkes verbunden sind und entsprechende Netzwerkgleichungen formuliert.
Drei Verfahren zur Analyse unterschiedlicher Netzwerke werden vorgestellt. Zunächst eines auf der Grundlage des Schaltbildes. Es kann zur Analyse einfacher Netzwerke angewandt werden und dient zugleich zur Klärung der Methode. Die Auswertung erfolgt manuell. Die zweite Methode beruht auf der Matrizenbeschreibung des Netzwerkes und schließt die Formulierung eines kompletten Satzes von Netzwerkgleichungen ein, die dann reduziert und durch Matrizenoperationen gelöst werden. Diese Methode ist leicht zu verstehen aber langwierig zu handhaben. Die dritte formuliert direkt einen reduzierten Satz von Netzwerkgleichungen. Diese Methode ist die kürzeste. Die beiden letztgenannten sind algorithmische, sie können als Grundlage für ein Rechnerprogramm dienen.
Das Buch gliedert sich in neun, voneinander unabhängige Abschnitte:

- Grundkonzepte der Netzwerktheorie
- Analyse linearer Netzwerke im Frequenzbereich
- Analyse linearer dynamischer Netzwerke im Zeitbereich
- Analyse nichtlinearer Widerstandsnetzwerke
- Analyse nichtlinearer, zeitvariabler Netzwerke im Zeitbereich
- Berechnung von Übertragungskenngrößen und Empfindlichkeitsparametern
- Analyse linearer Signalfluß-Netzwerke
- Gemischt kontinuierlich-diskrete Signalflußplan-Netzwerke
- Schaltkondensator-Netzwerke.

Neben den klassischen Netzwerken des Kirchhoff-Typs werden in den Abschnitten 7 und 8 kontinuierliche und zeitdiskrete

Signalflußnetzwerke behandelt. Das Buch geht wesentlich über das allgemeine Grundwissen des Ingenieurs hinaus und ermöglicht eine breite und systematische Einführung in die Netzwerktheorie. Es ist vor allem für den theoretisch orientierten Leser interessant, insbesondere als Grundlage für die Erarbeitung von Netzwerkanalyseprogrammen.

R. Schönfeld, Dresden EA 3008

Steuerungen in der Automatisierungstechnik

Herausgegeben vom Institut für Fachschulwesen der DDR. Gesamtredaktion und Federführung *G. Graichen* und *H. Kolb*. 1. Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik 1988. 312 Seiten, 220 Bilder, 25 Tafeln

Im Zuge der ständig weiter fortschreitenden Rationalisierung der Produktionsprozesse einschließlich aller dazugehörenden Hilfsprozesse unter anderem durch den Einsatz der Mikroelektronik und Mikrorechentechnik sowie damit im Zusammenhang mit der Verwirklichung bedienarmer flexibler Fertigungssysteme kommt es darauf an, eine mit dieser Entwicklung schritthaltende Ingenieurausbildung zu realisieren. Das vorliegende Fachschullehrbuch wurde unter diesem Blickwinkel entsprechend dem Lehrprogramm „Automatisierungstechnik" der Grundstudienrichtung Maschineningenieurwesen konzipiert und von einem kompetenten Autorenkollektiv erarbeitet.

Im einzelnen werden nach einführenden Bemerkungen zu allgemeinen Aspekten der Automatisierungstechnik im ersten Buchabschnitt die wichtigsten fachspezifischen Grundbegriffe, die prinzipiellen Steuerungsstrukturen sowie die wichtigsten Signalarten erläutert und Hinweise zu den Darstellungsweisen gerätetechnischer und funktionaler Zusammenhänge gegeben. Im zweiten und dritten Abschnitt werden die mathematischen Beschreibungsmethoden für lineare Glieder sowie einige Grundlagen der Digitaltechnik (Signalgewinnung, -wandlung, -verarbeitung und -nutzung, wichtige Gesetze der Schaltalgebra, Entwurf von Kombinationsschaltungen) erläutert.

Im vierten Abschnitt schließen sich Mittel, Methoden und Verfahren der Prozeßanalyse für kontinuierliche und diskrete Prozesse an und im fünften und sechsten die Grundlagen der industriellen Steuerungs- und Regelungstechnik. Entwurfsverfahren für Ablaufsteuerungen sowie Güterkriterien und Einstellregeln für lineare unvermaschte Regelkreise gehören dabei zum Betrachtungsumfang. Im siebenten Abschnitt werden in gestraffter Form Aufbau, Wirkungsweise und Grundzüge der Programmierung von Mikrorechnern beschrieben. Darauf aufbauend folgen im achten Abschnitt eine Darstellung der wichtigsten Grundlagen der digitalen Regelungstechnik und im neunten Abschnitt eine Betrachtung ausgewählter Steuerungsgerätesysteme auf der Basis von Mikrorechnern, wie speicherprogrammierbare Steuerungen, CNC-Systeme und Industrierobotersteuerungen.

Die Autoren sind durchgängig um eine klare anschauliche Darstellungsweise bemüht. Damit wird sich das vorgelegte Buch sicher im Sinne der eingangs genannten Zielstellung als Lehr- und Nachschlagewerk für Direkt- und Fernstudenten oder Weiterbildungsteilnehmer bewähren.

E. Habiger, Dresden EA 2993

Lexikon der Maße und Gewichte

Zusammengestellt von *Gerhard Hellwig*. München: Orbis Verlag 1988. 320 Seiten, etwa 5000 Stichwörter

Der Tittel untertreibt etwas: Das kleine Lexikon enthält nämlich nicht nur — wie man vermuten könnte — Einheiten und Größenarten, sondern darüber hinaus Währungen, Sternbilder, Monatsnamen, Papier- und Buchformate, Biografien von Personen, nach denen Einheiten benannt wurden, Staatsinstitute, allgemeine Begriffe, wie Zeitrechnung, Zeitzonen, Kalender, Münzen usw. sowie in dem 50 Seiten umfassenden Anhang Tabellen mit physikalischen Kennwerten von Elementen und Verbindungen, Definitionen, Zeichen, Symbole, Rechenverfahren usw. Man sieht, daß die Thematik sehr weit gefaßt wurde. Auch Tabellen im Lexikonteil enthalten Informationen, die man vielleicht nicht erwartet hat, z.B. Bremsweg und Bremszeit von Fahrzeugen, Erdbebenstärke, Seegang, Härte von Mineralien, ja sogar Konfektionsgrößen. Es ist deshalb kein Wunder, daß man sich häufig „festliest". Die Einheiten- und Währungsangaben sind aus der ganzen Welt zusammengetragen und umfassen die Zeit von der Antike bis zur Gegenwart. Die Skala reicht von der altsyrischen Masseeinheit „Abbasi" bis zum „Zypern-Pfund".

Leider läßt die Übereinstimmung zwischen Text und Tabellen etwas zu wünschen übrig. So werden in Tabellen häufig antiquierte Einheiten oder Einheitenzeichen verwendet, die im Text — richtig — als veraltet und nicht mehr zulässig gekennzeichnet sind. Seit der Erarbeitung des Lexikons dürfte einige Zeit vergangen sein, denn es enthält weder die neue Meterdefinition noch die neue Candeladefinition, und auch die seit einigen Jahren international übliche Einheit Hektopascal für den Luftdruck ist nicht angeführt.

R. Fischer, Berlin EA 3070

Berichtigung

Im Heft 4/1989 muß es in der Titelbildunterschrift (S. 121) richtig heißen:

„Unser Bild zeigt einen Drehstrom-Turbogenerator H 71 × 10,5 (71 MVA/60 MW/10,5 kV) mit Wasserstoffkühlung".

Elektrische Stellantriebe kleiner Leistung

Von *Chr. Richter*. Berlin: VEB Verlag Technik 1987. 124 Seiten, 88 Bilder, 3 Tafeln. 17,— M. Bestell-Nr. 5737223

Elektrische Stellantriebe zählen zu den wesentlichsten Baugruppen in der modernen Automatisierungstechnik. Wegen seiner ausgezeichneten dynamischen Eigenschaften dominiert bei Stellantrieben großer Leistung noch der übliche Gleichstrommotor. Bei Stellantrieben kleiner Leistung hingegen haben sich mehr und mehr unkonventionelle Ausführungsformen des Gleichstrommotors und auch spezielle Typen elektrischer Maschinen durchgesetzt, die zum Teil ohne Ansteuerelektronik nicht betriebsfähig sind. Aber auch die Auffindung optimaler Lösungen der Stellaufgabe macht die Einbeziehung der Ansteuerelektronik notwendig. Mit der komplexen Betrachtung gleichstromgespeister elektrischer Stellantriebe kleiner Leistung wird eine echte Lücke im Fachbuchangebot geschlossen.

Ausgehend von der Struktur eines Kleinstellantriebes werden die wichtigsten Kleinstantriebsarten für Gleichstromspeisung dargestellt; es sind dies der Kleinstantrieb mit Schrittmotor und der mit Gleichstromkleinstmotor. Dabei stehen zunächst die Motoren mit ihren speziellen Bauformen im Vordergrund. Es folgt eine Beschreibung der prinzipiellen Ansteuerelektronik. Den Schluß der beiden angedeuteten Hauptkapitel bildet die Erörterung des stationären und nichtstationären Betriebsverhaltens des jeweiligen Stellantriebes, wobei auch schon auf wichtige Schaltungen eingegangen wird.

Besonders wertvoll für den Leser ist die Betrachtung typischer Antriebsaufgaben, die nicht nur systematisch und umfassend dargestellt werden, sondern es erfolgen auch ein Vergleich von Gleichstrom- und Schrittantrieben sowie die Angabe des prinzipiellen Lösungsweges für Antriebsaufgaben. Am Schluß dieses Hauptkapitels findet sich die exemplarische Darstellung wesentlicher konkreter Antriebsaufgaben sowohl im Entwurf als auch in der Nachrechnung: der Papierantrieb für ein registrierendes Meßgerät, der Antrieb eines Plattenspeichergerätes, einer Kolbendosierpumpe, einer Leiterplattenbohreinheit, einer Schlauchpumpe, eines Seilzuges für ein schreibendes Gerät und eines Lichtzeichenkopfes.

Das Buch soll mit dem neuesten technischen Stand der Kleinststellantriebe bekannt machen und gleichzeitig eine Anleitung zum Lösen praktischer Aufgaben sein. In diesem Sinne entspricht der Umfang der einzelnen Kapitel der Bedeutung des dargestellten Stoffs. Das Buch kann sowohl dem Anwender als auch dem Projektanten elektrischer Stellantriebe kleiner Leistung und selbstverständlich auch dem Studierenden wärmstens empfohlen werden.

K. Vogt, Dresden EA 2994

Documentation

Ermisch, J.

20 Years Research in the Field of Nonconventional Measuring Transformers

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, pp. 205–207, 4 Figs., 21 Refs.

This contribution gives a survey of the fore-running research in the field of new Measuring Transformers, done at the TU of Dresden. Besides the representation of the most important results reached, solution possibilities are indicated, which are investigation objects of the next years.

Kunckel, K.-H.

Transformers — to the Development State

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, pp. 208–210, 1 Fig., 7 Equations

This contribution represents in form of thesis the description of the present development state of the commercial current measuring techniques in electric energy supply networks. The illustrated knowledges are derived from a recherche of the scientific literature of the period of the last 30 years and of the dissertations, published in the GDR. The paper is structured into the chapters theory and computing structure forms, insulation, standardizing and regulations, nonconventional measuring value acquisition and special problems.

Winkler, W.

Correct Operation Mode of Protecting Equipments in Spite of Temporal Current Transformers Saturation

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, pp, 211–213 and 218, 4 Figs., 2 Equations, 18 Refs.

Transient current transformer saturations, effected by d.c. elements in short-circuit currents, slowly dying-out, result in distortions of the secondary current signals. To maintaining under this conditions the correct behaviour of quickly protecting equipments corresponding measuring methods were developed. This contribution provides for a survey of such methods, having already proved in practical protecting equipments.

Jalmuzny, W.

Determining the Total Fault of Current Inverters in the Overcurrent Field by Means of the Voltage Mapping Method

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, pp. 213–215, 5 Figs., 15 Equations, 13 Refs.

Investigations at three current inverter models with different leakage reactance of the secondary winding are represented. The calculation of the results of measuring the total fault in comparison to the results of the differential method has proved positively to the proposed method.

Gruhn, G.

To the Testing and Using Protecting Current Transformers with Laminated Cores

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, pp. 216–218, 7 Figs., 16 Equations, 5 Refs.

The faulty behaviour of protecting current transformer of the class P in toroidal core construction with grain-oriented lamination and in laminated core construction with dynamo sheet is compared one with another on base of the fault charakteristic lines, determined experimentally. With regard of indicating the parameters of laminated core transformer conclusions are made, to be able to convert transmission areas in burden variations. Proposals for testing uniquely and optimizing those current transformer are made. Furthermore, it is studied, in what respect protecting current transformer of the class P are adapted to transmitting displaced short-circuit processes. Relations to determining the reliable control, that is the knee point voltage, are given.

Buchholz, D; et al.

Overvoltage Device

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, pp. 219–221, 9 Figs., 3 Refs.

An additional device is represented, which makes possible detecting and registering automatically transient voltage curves by using the so-called tan δ-foil of a current transformer as auxiliary energy source and transducer. The experiences are described, reached by means of the testing model.

Roseburg, D.

Loss Computing in Ferromagnetic Vessel Screenings and in the Vessel Parts of Transformers Screened by Those

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, pp. 222–224, 8 Figs., 1 Table, 15 Equations, 5 Refs.

Algorithms for computing segmentally losses in the magnetic shunt and in the vessel wall of transformers are given, screened by that. The computations are basing upon the normal component, determined numerically (2D), of the magnetic induction at the surface of the components.

Kubusch, M.

Computing the Losses in Electromagnetically Screened Pressed Poles of Transformers

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, pp. 225–228, 12 Figs., 8 Equations, 5 Refs.

For describing the operation mode of a pressed pole screening, electrically good conducting, an electric equivalent circuit is developed. The equation system, derived therefrom, makes possible computing both the eddy current and loss density distributions of electromagnetic pressed pole screenings as well as the flux and loss density distributions of screened ferromagnetic pressed poles. Checking the flux distributions of screened pressed poles of a single-phase model transformer and a three-phase one confirms the useability of the computing method proposed.

Bunzel, E.; Oswald, B.

Tendencies in the Mathematically Representing Non-Stationary Operating States of Synchronous Machines

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, pp. 228–233, 7 Figs., 1 Table, 7 Equations, 14 Refs.

The computing techniques, generally offered, makes possible simulating the operating behaviour of electric machines without substantial restrictions and with extended mathematical models. The model range and the model structure are adapted corresponding to the requirements, and they are further developed permanently. Computer solutions are represented and compared with classic ones. A new classification of the simulating models is made a subject for discussion.

Документация

Эрмиш, Й.

20 лет научных исследований в области нетрадиционных преобразователей

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 6, стр. 205–207, 4 рис., 21 лит.

В статье дается обзор о достигнутом на техническом университете Дрездена научно-исследовательском заделе в области новых измерительных преобразователей. Помимо изложения важнейших достигнутых результатов показываются пути решения, представляющие собой обьекты научных исследований ближайших лет.

Кункель, К.-Х.

Трансформаторы тока — о состоянии развития

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 6, стр. 208–210, 1 рис., 7 уравн..

Статья в виде тезисов содержит описание сегодняшнего состояния развития эксплуатационной измерительной техники на сетях энергоснабжения. Изложенные факты получены в результате изучения специальной периодической печати за период последних 30 лет, а также из опубликованных в ГДР диссертаций. Статья подразделяется на разделы: теория и расчет, виды конструктивного исполнения, изоляция, нормирование и руководящие материалы, нетрадиционный учет измерительных данных и специальные проблемы.

Винклер, В.

Четкое функционирование защитных устройств несмотря на временное насыщение трансформатора тока

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 6, стр. 211–213 и 218, 4 рис., 2 уравн., 18 лит.

Переходные насыщения трансформатора тока, вызванные медленно затухающимися звеньями постоянного тока, приводят к искажению вторичных токовых сигналов. Для обеспечения в таких условиях четкого действия быстродействующих защитных устройств разработаны соответствующие измерительные способы. В статье дается обзор о таких способах, уже оправдавших себя в реализованных защитных устройствах.

Яльмуцны, В.

Определение суммарной ошибки трансформаторов тока в области максимального тока при помощи метода отображения напряжения

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 6, стр. 213–215, 5 рис., 15 уравн., 13 лит.

Представляются исследования на трех моделях трансформатора тока с различными значениями реактивности рассеяния вторичной обмотки. Оценка результатов измерения суммарной ошибки по сравнению с результатами полученными по дифференциальному методу измерения оказалась положительной в части предложенного метода.

Грун, Г.

Испытание и применение защитных трансформаторов тока на многослойных сердечниках

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 6, стр. 216–218, 7 рис., 16 уравн., 5 лит.

На базе характеристик ошибок, полученных экспериментальным образом, сопоставляется неправильное функционирование защитных трансформаторов тока класса P, выполненных на кольцевых сердечниках из текстурованной листовой стали и выполненных на многослойных сердечниках из динамной стали. Выводятся заключения относительно указания параметеров трансформаторов на многослойных сердечниках с целью обеспечения возможности пересчета диапазонов передачи в случае изменений полного сопротивления нагрузки трансформатора тока; выдвигаются предложения по однозначному испытанию и улучшенному выполнению таких трансформаторов тока. Кроме того, рассматривается вопрос о том, в какой мере защитные трансформаторы класса P являются пригодными для передачи смещенных процессов к.з. Приводятся соотношения для определения допустимого регулирования, т.е. напряжения в точке излома характеристики.

Бухгольц, Д. и. Др.

Устройство защиты от перенапряжения

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 6, стр. 219–221, 9 рис., 3 лит.

Представляется прибор-приставка, обеспечивающий автоматический сбор и регистрацию переходных характеристик напряжения с использованием так называемой фольги tan δ трансформатора тока в качестве вспомогательного источника энергии и датчика измеряемых величин. Приводится опыт, полученный на опытном образце.

Розебург, Д.

Расчет потерь во ферромагнитных экранировках кожухов и экранированных таким образом участках кожухов трансформаторов

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 6, стр. 222–224, 8 рис., I табл., 15 уравн., 5 лит.

Приводятся алгоритмы для расчета по участкам потерь в магнитном шунте и экранированной им стенке кожуха трансформатора. Расчеты основываются на нормальной составляющей магнитной индукции на поверхности конструкционных деталей, определенной числовым методом (2D).

Кубуш, М.

Расчет потерь в зажимных штангах трансформаторов с электромагнитной экранировкой

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 6, стр. 225–228, 12 рис., 8 уравн., 5 лит.

Разрабатывается эквивалентная схема для описания принципа действия экранировки зажимных штанг с хорошей электрической проводимостью. Выведенная отсюда система уравнений позволяет вычисление распределений вихревых токов и плотностей потерь электромагнитных экранировок зажимных штанг, а также распределений магнитной индукции и плотностей потерь экранированных зажимных штанг.

Дополнительный расчет распределений магнитной индукции экранированных зажимных штанг однофазового модельного трансформатора и трехфазного трансформатора подтверждает приемлемость предложенного метода вычисления.

Бунцель, Э.; Освальд, Б.

Тенденции в математическом представлении нестационарных рабочих режимов синхронных машин

ELEEKRIIE, Берлин 43 (1989) 6, стр. 228–233, 7 рис., 1 табл., 7 уравн., 14 лит.

Имеющиеся в распоряжении в нормальных случаях вычислительные средства позволяют моделирование электрических машин без существенных ограничений и с расширенными математическими моделями.

Объем и структура моделей согласовываются в соответствии с конкретной потребностью и постоянно усовершенствуются. Представляются и сопоставляются с классическими решениями компьютерные решения. Выдвигается на дискуссию новая классификация имитационных моделей.

Dokumentation

Ermisch, J.
20 Jahre Forschung auf dem Gebiet nichtkonventioneller Wandler
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, S. 205–207, 4 Bilder, 21 Lit.

Der Beitrag gibt einen Überblick über die an der TU Dresden geleistete Vorlaufforschung auf dem Gebiet neuer Meßwandler. Neben der Darstellung der wichtigsten erreichten Ergebnisse werden Lösungswege aufgezeigt, die Untersuchungsobjekte in den nächsten Jahren sind.

Kunckel, K.-H.
Stromwandler – zum Stand der Entwicklung
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, S. 208–210, 1 Bild, 7 Gln.

Der Aufsatz beinhaltet in thesenhafter Form die Beschreibung des gegenwärtigen Entwicklungsstandes der betrieblichen Strommeßtechnik in elektrischen Energieversorgungsnetzen.
Die dargestellten Erkenntnisse sind abgeleitet aus einer Recherche der Fachpresse für den Zeitraum der letzten 30 Jahre und aus den in der DDR veröffentlichten Dissertationsschriften. Die Arbeit ist gegliedert in die Abschnitte Theorie und Berechnung, Bauformen, Isolierung, Normung und Vorschriften, nichtkonventionelle Meßwerterfassung und Sonderprobleme.

Winkler, W.
Korrekte Funktionsweise von Schutzeinrichtungen trotz temporärer Stromwandlersättigung
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, S. 211–213 und 218, 4 Bilder, 2 Gln., 18 Lit.

Transiente Stromwandlersättigungen, hervorgerufen durch langsam abklingende Gleichstromglieder im Kurzschlußstrom, führen zu Verzerrung der sekundären Stromsignale. Um unter diesen Bedingungen das korrekte Verhalten von schnellen Schutzeinrichtungen zu gewährleisten, wurden entsprechende Meßverfahren entwickelt. Der Beitrag gibt eine Übersicht solcher Verfahren, die sich schon in praktischen Schutzeinrichtungen bewährt haben.

Jalmuzny, W.
Bestimmung des Gesamtfehlers von Stromwandlern im Überstromgebiet mittels Spannungsabbildungsmethode
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, S. 213–215, 5 Bilder, 15 Gln., 13 Lit.

Vorgestellt werden Untersuchungen an drei Stromwandlermodellen mit verschiedener Streureaktanz der Sekundärwicklung. Die Abschätzung der Ergebnisse der Gesamtfehlermessung im Vergleich zu den Ergebnissen des Differentialverfahrens hat sich als positiv für die vorgeschlagene Methode erwiesen.

Gruhn, G.
Zur Prüfung und Anwendung von Schutzstromwandlern mit Schichtkernen
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, S. 216–218, 7 Bilder, 16 Gln., 5 Lit.

Das Fehlverhalten von Schutzstromwandlern der Klasse P in Ringkernausführung mit Texturblech und in Schichtkernausführung mit Dynamoblech wird auf der Basis experimentell bestimmter Fehlerkennlinien gegenübergestellt. Es werden Schlußfolgerungen bzgl. der Angabe der Parameter von Schichtkernwandlern gezogen, um Übertragungsbereiche bei Bürdenänderungen umrechnen zu können und Vorschläge zur eindeutigen Prüfung und verbesserten Ausführung dieser Stromwandler unterbreitet. Desweiteren wird untersucht, inwiefern Schutzstromwandler der Klasse P zur Übertragung verlagerter Kurzschlußvorgänge geeignet sind. Beziehungen zur Bestimmung der zulässigen Aussteuerung, d.h. der Kniepunktspannung, werden angegeben.

Buchholz, D.; Ermisch, J.; Freiburger, J.; Hoppadietz, F.; Schroth, H.; Schwarz, H.
Überspannungsgerät
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, S. 219–221, 9 Bilder, 3 Lit,

Es wird ein Zusatzgerät vorgestellt, das unter Nutzung der sogenannten tan δ-Folie eines Stromwandlers als Hilfsenergiequelle und Meßwertgeber die automatische Erfassung und Registrierung von transienten Spannungsverläufen ermöglicht. Die mit dem Erprobungsmuster gewonnenen Erfahrungen werden beschrieben.

Roseburg, D.
Verlustberechnung in ferromagnetischen Kesselabschirmungen und in den damit geschirmten Kesselteilen von Transformatoren
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, S. 222–224, 8 Bilder, 1 Tafel, 15 Gln., 5 Lit.

Es werden Algorithmen zur abschnittweisen Verlustberechnung im magnetischen Shunt und der damit geschirmten Kesselwand von Transformatoren angegeben. Die Berechnungen basieren auf der numerisch (2D) ermittelten Normalkomponente der magnetischen Induktion an der Oberfläche der Bauteile.

Kubusch, M.
Berechnung der Verluste in elektromagnetisch abgeschirmten Preßstangen von Transformatoren
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, S. 225–228, 12 Bilder, 8 Gln., 5 Lit.

Zur Beschreibung der Wirkungsweise einer elektrisch gut leitenden Preßstangenabschirmung wird ein elektrisches Ersatzschaltbild entwickelt. Das daraus abgeleitete Gleichungssystem ermöglicht es, die Wirbelstrom- und Verlustdichteverteilungen elektromagnetischer Preßstangenabschirmungen sowie die Fluß- und Verlustdichteverteilungen abgeschirmter ferromagnetischer Preßstangen zu berechnen.
Die Nachrechnung der Flußverteilungen von abgeschirmten Preßstangen eines Einphasenmodelltransformators und eines Drehstromtransformators bestätigt die Anwendbarkeit des vorgeschlagenen Berechnungsweges.

Bunzel, E.; Oswald, B.
Tendenzen in der mathematischen Darstellung nichtstationärer Betriebszustände von Synchronmaschinen
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 6, S. 228–233, 7 Bilder, 1 Tafel, 7 Gln., 14 Lit.

Die allgemein zur Verfügung stehende Rechentechnik ermöglicht die Simulation des Betriebsverhaltens von elektrischen Maschinen ohne wesentliche Einschränkungen und mit erweiterten mathematischen Modellen.
Der Modellumfang und die Modellstruktur werden entsprechend den Erfordernissen angepaßt und ständig weiterentwickelt. Es werden Computerlösungen vorgestellt und mit klassischen Lösungen verglichen. Eine neue Klassifizierung der Simulations-Modelle wird zur Diskussion gestellt.

ELEKTRIE

Herausgeber	Kammer der Technik, Fachverband Elektrotechnik
Verlag	VEB Verlag Technik Oranienburger Str. 13/14, Berlin, DDR, 1020 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 2870 0; Telex: 0112228 techn. dd
Verlagsdirektor	Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus*
Redaktion	Dr.-Ing. *Klaus Heide*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870345) Ing. *Günther Barth*, Redakteur (Telefon 2870343)
Lizenz-Nr.	1100 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
Gesamtherstellung	III/18/328 Messedruck Leipzig, Bereich Borsdorf Borsdorf, 7122
Gestalter	*Eckhardt Natorp* (Telefon 2870287)
Anzeigenannahme	Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigenannahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, Berlin, 1020 PSF 201 Anzeigenpreisliste Nr. 7 Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, Hermann-Duncker-Str. 89, Berlin, DDR, 1157
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.
AN (EDV)	6730
Erscheinungsweise	monatlich 1 Heft
Heftpreis	2,50 M, Abonnementpreis vierteljährlich 7,50 M. Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Bezugsmöglichkeiten DDR	sämtliche Postämter
SVR Albanien	Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propagandit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana
VR Bulgarien	Direkzia R. E. P., 11a, Rue Paris, Sofia
VR China	China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P. O. Box 88 Beijing
ČSSR	PNS – Ústřední Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Slezská 11, 120000 Praha 2 PNS, Ústredna Expedicia a Dovoz Tlače Praha, Posta 022, 88547 Bratislava
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knjiiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzéće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
Koreanische DVR	CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang
Republik Kuba	Empresa de Comercio, Exterior de Publicationes, O'Reilly No., 407, Ciudad Habana
VR Polen	C. K. P. i. W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa
SR Rumänien	D. E. P. Bucaresti Piata Scinteii, Bucaresti
UdSSR	Städtische Abteilungen von Sojuzpečat' oder Postämter und Postkontore
Ungarische VR	P. K. H. I., Külföldi Elöfizetési Osztály, P. O. Box 16, 1426 Budapest
SR Vietnam	XUNHASABA 32, Hai Ba Trung, Hà Nôi
BRD und Berlin (West)	ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141–167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30
Österreich	Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, 2345 Brunn am Gebirge
Schweiz	Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Fachbuchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, Leipzig, DDR, 7010, Postfach 160; und Leipzig Book Service, Talstraße 29, Leipzig, DDR, 7010

In zweiter, bearbeiteter Auflage:

Einführung in die Elektrotechnik-Elektronik

Von Prof. Dr. sc. techn. Horst Elschner und Prof. Dr.-Ing. habil. Albrecht Möschwitzer
448 Seiten, 505 Bilder, 48 Tafeln, Leinen, DDR 33,– M, Ausland 42,– MD. Bestellangaben: 5537290/Elschner, Elektrotechnik

Das Hochschullehrbuch führt in die allgemeine Elektrotechnik und, darauf aufbauend, in die verschiedenen Disziplinen der Elektrotechnik ein. Diese breit gefächerte Thematik erfordert eine sehr sorgfältige Stoffauswahl und eine knappe Darstellung. So können jeweils nur die Grundgedanken und die wichtigsten Methoden dargelegt werden. Zum intensiveren Studium einzelner Gebiete wird auf weiterführende Literatur verwiesen.
Besonderer Wert wurde auf eine didaktisch und methodisch günstige Darstellung gelegt. Zahlreiche Bilder und Kurvendarstellungen veranschaulichen die Zusammenhänge. In den Text eingefügte Aufgaben mit Lösungen fördern das Verständnis und die aktive Beherrschung des Stoffs.

AUS DEM INHALT:

Grundbegriffe elektrischer Stromkreise
Stromkreise ohne Energiespeicher
Wechselstromkreise
Stromkreise bei beliebiger Erregung
Analogien zwischen elektrischen und nichtelektrischen Systemen
Elektrische Felder und Stromflußmechanismen
Magnetische und elektromagnetische Felder

Bauelemente und einfache Schaltungen der Elektronik
Widerstände · Kondensatoren (Kapazitäten) · Spulen (Induktivitäten) und Übertrager · Halbleiterdioden · Bipolartransistoren · Feldeffekttransistoren · Thyristoren · Optoelektronische Bauelemente · Kontakte und Relais

Technologie elektronischer Schaltungen

Elektronische Systeme
Analogschaltungen · Digitalschaltungen D/A- und A/D-Konverter · Mikrorechner · Kunden- und Semikundenwunschschaltung

Elektrische Energietechnik

Elektrische Meßtechnik

Automatisierungstechnik
Grundbegriffe · Steuerung · Regelung

Zuverlässigkeit

Anhang A 1
Definition der Basiseinheiten · Definition der ergänzenden SI-Einheiten · Abgeleitete SI-Einheiten mit selbständigem Namen · SI-fremde Einheiten · Weitere Größenarten

Anhang A 2
Knotenspannungsanalyse. Maschenstromanalyse. Weitere Gleichungssysteme für die Netzwerkanalyse

Anhang A 3
Herstellerangaben zu elektronischen Bauelementen · Darstellung elektrotechnischer Einrichtungen bzw. Anlagen.

In dieser Auflage wurden besonders die Abschnitte über Knotenspannungs- und Maschenstromanalyse, elektromagnetische Felder, elektronische Systeme, Meßtechnik sowie Zuverlässigkeit methodisch bearbeitet und aktualisiert.

Im Fachbuchhandel erhältlich

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

ISSN 0013–5399
ELEKTRIE · Berlin 43 (1989) 6 · S. 201–240

6739 6 177 027 405
KOMB KERAM WERKE
8612 7001 0136 PF 1

Erstauflage · Kürzlich erschienen

Von Dr. sc. techn. Christian Hoy, Prof. em. Dr.-Ing. Harald Koettnitz und
Prof. Dr. sc. techn. M. V. Kostenko
240 Seiten, 117 Bilder, 10 Tafeln, Leinen, DDR 33,– M, Ausland 56,– DM.
Bestellangaben: 5538891/Hoy, Wellenvorgänge

Hauptanliegen der Monographie ist die Bereitstellung wirklichkeitsnaher mathematischer Modelle des Elektroenergiesystems, besonders der Hochspannungsfreileitung, mit deren Hilfe die Untersuchung sowohl von stationären Vorgängen (verzweigte Trägerfrequenzstrecken) als auch von schnellverlaufenden Ausgleichsvorgängen (Schalt- und Blitzüberspannungen) unter Einsatz der modernen Rechentechnik möglich ist.
Im Teil 1 wird die Theorie der sinusförmigen Vorgänge auf den Grundlagen der Matrizenalgebra und der Modaltransformation im Frequenzbereich abgehandelt, im Teil 2 ist die Theorie der nichtstationären Vorgänge auf dem Mehrleitersystem der Hochspannungsfreileitung auf der Basis des Fourier-Umkehrintegrals für den Übergang vom Frequenzbereich in den Zeitbereich dargestellt. Es wird ein Algorithmus zur Berechnung schnellverlaufender Ausgleichsvorgänge im Elektroenergiesystem entwickelt. Er gestattet auch, die Korona- und die frequenzabhängige Dämpfung zu berücksichtigen. Im Teil 3 werden ausgewählte Beispiele der praktischen Anwendung vorgestellt: Betriebsdämpfung von Trägerfrequenzübertragung (TFH und TFE), wirksame Wellenwiderstände nach Abstandskurzschluß, Einschaltüberspannungen, Blitzüberspannungen.
Die Autoren waren bestrebt, die im Zeitbereich benötigten Modelle der Freileitung systematisch aus den Modellen im Frequenzbereich herzuleiten. Damit sind erstmalig in der Literatur die Modellierungsprobleme für stationäre und nichtstationäre (schnellverlaufende) Vorgänge zusammen unter einheitlichem systemtheoretischem Aspekt abgehandelt.
Typisch für die Darstellung des Stoffs ist die Verarbeitung von Erkenntnissen anderer Wissenschaftsgebiete, wie der Systemtheorie, der mathematischen Statistik, der numerischen Mathematik u.a. Dennoch strebten die Autoren danach, bei der Interpretation der Modelle und der Ergebnisse vom physikalischen Verständnis auszugehen und an vorhandenes Wissen sowie an die Denkgewohnheiten des Ingenieurs anzuknüpfen.

Im Fachbuchhandel erhältlich

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN